

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Integrace xPON sítí do jedné sítě
Integration of xPON Networks into One Network

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Michal Bajer

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Integrace xPON sítí do jedné sítě
Integration of xPON Networks into One Network

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor EPON a WDM PON sítí.
2. Simulace komunikace EPON a WDM PON po jednom optickém vlákně.
3. Vyhodnocení zapojené topologie z pohledu kritických parametrů pro takto vytvořenou optickou síť.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KAZOVSKY, Leonid G., et al.; *Broadband Optical Access Networks*. Canada: Wiley, 2011. 283 p.. ISBN 978-0-470-18235-2.
- [2] MA, Maode. *Current Research Progress of Optical Networks*. 1st Edition. [s.l.]: Springer, 2009. 282 p. ISBN 978-1402098888
- [3] LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Onc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0
- [4] DHAINI, Ahmad R. *Next-Generation Passive Optical Networks*. Saarbrücken: VDM Verlag, 2008. 132 p. ISBN 978-3836435062

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

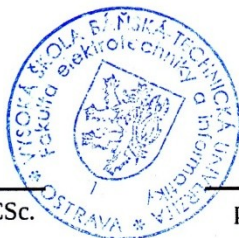
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Šiška, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 2. 5. 2013

.....*Bayez*.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Šiškoví, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá teoretickým popisem WDM PON a EPON sítí. U WDM PON sítí se zaměřuje na používaná pásma a také na různé způsoby přenosu signálu. Dále se zaměřuje na popis některých důležitých součástí optických sítí, jako jsou například zdroje, detektory a AWG filtry.

Druhá část práce se zabývá vytvořením a popisem schématu kombinované WDM PON a EPON ver.2 sítě navržené ve vývojovém prostředí Optiwave Optisystem 11, které jsou provozovány po jednom společném optickém vlákně a nalezení maximálního dosahu takové sítě.

Poslední část práce se zaměřuje na vyhodnocení naměřených výsledků této simulované sítě a případné návrhy na zlepšení vlastností této sítě.

Klíčová slova: PON, WDM PON, EPON, topologie, FTTx, CWDM, DWDM, AWG, PIN, APD, zdroje optického záření, detektory optického záření, laser, Optiwave Optisystem 11.

Abstract

This thesis is about to present theoretical description of WDM PON and EPON network. The WDM PON part focuses on used bandwidth and a different ways of signal transmission. Further focuses on the description of important parts of the optical networks, such as sources, detectors and AWG filters.

The second part deals with the creation and description of scheme for a combined WDM PON and EPON ver. 2 network designed in the development environment Optiwave Optisystem 11, which are operated by one optical fiber and finding the maximum reachable distance of such a network.

Last part of this thesis focuses on the evaluation of measured results of this simulated network and suggestions to improve the properties of this network.

Key Words: PON, WDM PON, EPON, topology, FTTx, CWDM, DWDM, AWG, PIN, APD, optical transmitters, optical detectors, laser, Optiwave Optisystem 11.

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
B	Hz	Šířka pásma
f	Hz	Frekvence
I	A	Proud
I_{th}	A	Tepelný šum
i_{thN}	A*Hz ^{-1/2}	Normalizovaný tepelný šum
K	J*K ⁻¹	Boltzmanova konstanta
P	W	Výkon
P_p	dBm	Přijímaná výkonová úroveň
P_{pr}	dBm	Přijímaná průměrná výkonová úroveň
P_v	dBm	Vysílaná výkonová úroveň
R_L	Ω	Odpor
T	K	Teplota
U	V	Napětí
λ	m	Vlnová délka

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický význam	Český význam
APD	Avalanche Photo Diode	Lavinová fotodioda
AWG	Arrayed Waveguide Grating	Uspořádaná mřížka vlnodů
BER	Bit Error Rate	Bitová chybovost
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplex	Hrubý vlnový multiplex
DFB	Distributed Feedback	Distribuovaná zpětná vazba
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex	Hustý vlnový multiplex
EPON	Ethernet Passive Optical Network	Ethernetová pasivní optická síť
FTTB	Fiber to the Basement/Building	Vlákno do sklepa/budovy
FTTC	Fiber to the Cabinet/Curb	Vlákno do rozvaděče/k chodníku
FTTH	Fiber to the Home	Vlákno do domu
FTTN	Fiber to the Node	Vlákno do uzlu
FTTO	Fiber to the Office	Vlákno do kanceláře
FTTx	Fiber to the point x	Vlákno do bodu x
GEAPON	Gigabit Ethernet Passive Optical Network	Gigabitová ethernetová pasivní optická síť
ITU-T	International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector	Mezinárodní telekomunikační unie – Sektor standardizace telekomunikací
LD	Laser Diode	Laserová dioda
LED	Light Emitting Diode	Světlo emitující dioda
NRZ	Not Return to Zero	Bez návratu k nule
NT	Network Termination	Síťové ukončení
ODN	Optical Distribution Network	Optická distribuční síť
OLT	Optical Line Termination	Optické linkové ukončení
ONT	Optical Network Termination	Optické síťové ukončení
ONU	Optical Network Unit	Optická síťová jednotka
PIN	P-type, intrinsic, N-type	P-typ, intrinzičná vrstva, N-typ
PON	Passive optical network	Pasivní optická síť
RZ	Return to Zero	S návratem k nule

TDM	Time Division Multiplexing	Časový multiplex
TDMA	Time Division Multiple Access	Mnohonásobný přístup pomocí časového dělení
UTP	Unshielded Twisted Pair	Nestíněný kroucený pár
WDM PON	Wavelength Division Multiplex Passive optical network	Pasivní optická síť s vlnovým multiplexem

Obsah

1	Úvod.....	1
2	PON síť.....	2
2.1	Rozdělení FTTx podle umístění zakončení vlákna	3
2.2	Základní funkční bloky optické přístupové sítě	4
2.3	Typy topologií PON.....	5
3	EPON síť.....	7
3.1	Typy EPON sítí.....	8
3.2	Princip přenosu v síti EPON	8
4	WDM PON síť.....	10
4.1	CWDM.....	10
4.1.1	Používané vlnové délky	10
4.2	DWDM.....	11
4.2.1	Používané vlnové délky	12
4.3	Varianty přenosu signálu ve WDM PON.....	12
4.3.1	Metoda s pevně přiřazenými vlnovými délkami	12
4.3.2	Metoda s vydělováním vlnových délek.....	14
4.3.3	Metoda kombinace pasivních rozbočovačů a AWG	16
4.4	Princip přiřazení vlnových délek ve WDM PON.....	16
4.5	Zdroje optického záření.....	17
4.5.1	Princip funkce polovodičového laseru	18
4.5.2	Fabry-Perotův laser	19
4.5.3	DFB laser.....	20
4.5.4	Laditelný laser	20
4.5.5	Širokospektrální laserový zdroj s AWG filtrem.....	20
4.5.6	Spektra různých druhů diod	20
4.6	Detektory optického záření	21
4.6.1	Výstřelový šum	21
4.6.2	Temný proud	22
4.6.3	Tepelný šum	22
4.6.4	Fotodetektor PIN	22
4.6.5	Fotodetektor APD	23

5	Simulace komunikace GEPON a WDM PON po jednom vlákně.....	25
5.1	Popis sítě a její parametry	25
5.1.1	Parametry WDM PON sítě.....	25
5.1.2	Parametry GEPON sítě.....	25
5.1.3	Optické vlákno	25
5.1.4	Fotodetektory	26
5.2	Návrh sítě v Optiwave Optisystem 11.....	26
5.2.1	Blokové schéma sítě.....	26
5.3	Strana OLT.....	27
5.3.1	Vysílač OLT WDM PON.....	27
5.3.2	Vysílací jednotka FP	28
5.3.3	Zdroj vlnových délek pro naladění ONU jednotek	29
5.3.4	Vysílač GEPON 1490 nm	30
5.3.5	Přijímač WDM PON	30
5.3.6	Přijímač GEPON 1310 nm	30
5.4	Optické vlákno a multiplexory	30
5.4.1	Spektrum za multiplexorem pro směr sestupný	30
5.4.2	Spektrum za demultiplexorem pro směr sestupný.....	31
5.4.3	Spektra za multiplexorem pro směr vzestupný	32
5.4.4	Spektra za demultiplexorem pro směr vzestupný.....	33
5.5	Strana ONU.....	34
5.5.1	Přijímač WDM PON	34
5.5.2	Přijímací jednotka	34
5.5.3	Vysílač WDM PON	35
5.5.4	Přijímač GEPON	35
5.5.5	Vysílač GEPON	35
6	Výsledky simulace a vyhodnocení zapojené topologie.....	36
6.1	Kódování NRZ pro WDM PON.....	36
6.2	Kódování RZ pro WDM PON	39
6.3	Vyhodnocení naměřených dat.....	45
7	Závěr	46
	Použitá literatura	47
	Seznam příloh.....	48

1 Úvod

V dnešní době dochází k velkému a rychlému rozvoji optických sítí. Tyto sítě již neslouží pouze jako páteřní síť, ale jsou stále častěji zaváděny i do měst jako řešení připojení k internetu pro domácnosti a kancelářské budovy. Dnes jsou nejrozšířenějšími typy připojení sítí typu EPON ver. 2, která se v rámci marketingového řešení označuje jako GEPON a WDM PON. S neustále se zvětšujícími objemy přenášených dat je potřeba také zvyšovat rychlost přenosu. Také dochází k pomalému přechodu uživatelů od metalických řešení připojení k těm optickým. S tím souvisí další náklady pro provozovatele těchto sítí, protože mezi největší náklady na vybudování optické sítě patří pokládka optického kabelu. Tato diplomová práce se zabývá možností spojení GEPON a WDM PON sítí do jediného optického vlákna. Tím se otevírá možnost ušetřit náklady na pokládku nových vláken, protože bude možné rozšířit provoz na již vybudovaných sítích tím, že se například ke GEPON síti připojí i WDM PON síť a tím se zvýší počet připojených uživatelů bez nutnosti budování nové sítě.

Cílem této diplomové práce je v teoretické části popsat WDM PON a GEPON sítě a v části praktické najít maximální dosah kombinované sítě WDM PON a GEPON provozovaných na jednom optickém vlákně.

První část této práce se zabývá rozdělením optických sítí a popisem funkce a principu činnosti těchto optických sítí. Při popisu GEPON sítě se tato práce zabývá základním rozdělením této sítě a principem činnosti. Část popisující WDM PON síť se zaměřuje na popis a rozdělení pracovních vlnových délek a různých druhů přenosu. Dále jsou v teoretické části práce popsány některé vybrané součásti přenosového řetězce, jako jsou například laserové zdroje, detektory a další nedílné součásti optické sítě.

Ve druhé části diplomové práce je vypracován návrh sítí WDM PON a GEPON komunikujících společně po jednom optickém vlákně. Tento návrh je vytvořen pomocí simulačního vývojového prostředí Optiwave Optisystem 11. Vytvořená síť je složena z několika částí a je popsáno nastavení sítě a její části.

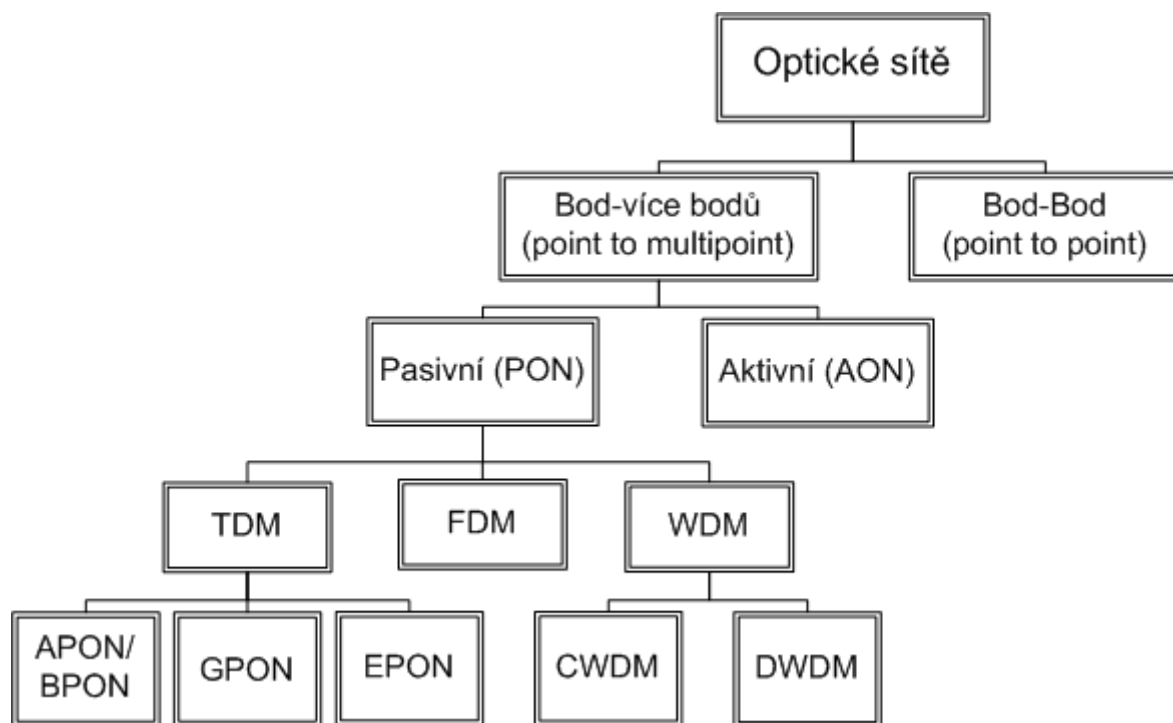
Třetí část se zabývá vyhodnocením takto navržené sítě. Je zkoumán dosah sítě, tj. maximální překlenutelná délka vlákna tak, aby byl na konci sítě stále kvalitní signál. Dále je zjišťován vliv, jakým na sebe obě sítě působí a jak se ovlivňují z hlediska dosahu. Jsou také vyhodnoceny parametry sítě, jako je chybovost, výkony, spektra a tak dále.

Závěr práce popisuje dosažené výsledky, vyhodnocuje dosah této kombinované optické sítě, navrhuje zlepšení a shrnuje přínos této práce.

2 PON síť

PON (Passive Optical Network), česky pasivní optická síť, je technologie, která se používá pro přenos informací po optickém vlákně. Největší výhodou sítě tohoto typu je to, že mezi ústřednou poskytovatele internetového připojení a koncovým účastníkem se nemusí používat žádné aktivně napájené síťové prvky – proto pasivní síť.

Optické sítě se dělí na sítě typu point-to-multipoint (bod-více bodů) a point-to-point (bod-bod). Tato práce se zabývá pouze vybranými sítěmi typu point-to-multipoint. Do nich patří právě síť typu PON, které se ještě dále dělí, a mezi které patří EPON a WDM PON síť, kterými se bude tato práce podrobněji zabývat. Rozdělení optických sítí ukazuje obrázek 2.1. [1]



Obrázek 2.1: Rozdělení optických sítí

Jak je vidět z výše uvedeného obrázku, PON síť pracuje na přenosovém principu point-to-multipoint, která umožňuje přenášet po jednom vlákně zašifrované informace, které jsou na konci trasy pomocí optického rozbočovače (dělič, splitter) rozděleny na jednotlivé účastnické datové toky. Tímto způsobem je kapacita vlákna rozdělena mezi určité množství koncových uživatelů. Z toho plyne další výhoda PON sítě – k poskytnutí služeb většímu množství zákazníků stačí jediné optické vlákno.

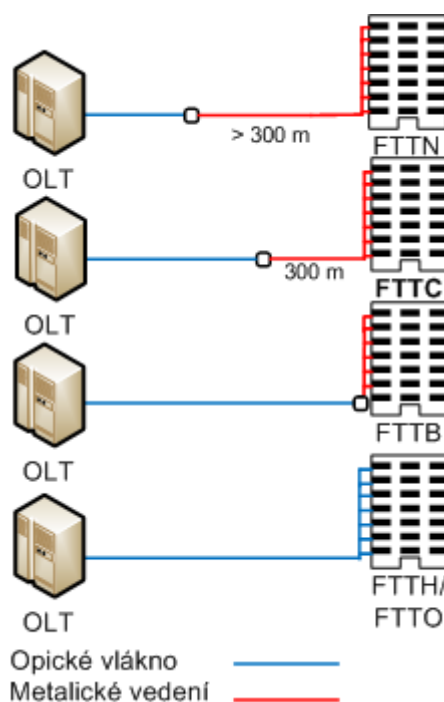
2.1 Rozdělení FTTx podle umístění zakončení vlákna

Pasivní optická síť využívá architekturu FTTx (Fiber to the x - vlákno až do/k bodu x). Tato technologie se využívá jako náhrada klasických metalických vedení na trase mezi koncovým bodem sítě (typicky ústředna) a zákazníkem. Písmeno „x“ ve zkratce se potom nahrazuje jiným písmenem podle toho, kde je optické vlákno ukončeno. Po ukončení vlákna v přípojně skříní (uzlu), je poté vedena přípojka ke koncovému uživateli v alternativní podobě. Většinou se jedná o kroucenou dvojlinku (UTP), koaxiální kabel nebo bezdrátový spoj. Rozdělení FTTx je popsáno níže a graficky je ukázáno na obrázku 2.2. [2]

- FTTN (Fiber to the Node) – Optické vlákno je zakončeno v uzlu, který je umístěný ve vzdálenosti od několika set metrů až do několika kilometrů od objektu koncového zákazníka.
- FTTC (Fiber to the Cabinet/Curb) – Jedná se o podobnou realizaci jako je FTTN, ale s tím rozdílem, že uzel je podstatně blíže k prostorám koncového uživatele; obvykle se jedná o vzdálenost do 300 metrů (Cabinet) a odtud se potom vedení k uživatelům realizuje metalickými kabely; pokud se jedná o verzi Curb, je optické vlákno přivedeno až k chodníku do blízkosti budov.
- FTTB (Fiber to the Building/Basement) – Optické vlákno dosahuje až k hranici budovy koncového uživatele, uzel je obvykle umístěn v suterénu domu; další vedení k uživateli je řešeno jinými způsoby, například metalickým či bezdrátovým vedením.

Následující 2 řešení zakončení optického vlákna jsou čistě optická a využívají se tam, kde jsou velké nároky na přenosovou kapacitu.

- FTTO (Fiber to the Office) – Vlákno je dovedeno až do prostor kancelářských budov a k zákazníkům s velkými požadavky na přenosovou kapacitu.
- FTTH (Fiber to the Home) – Vlákno je přivedeno až ke koncovému bodu sítě, může být ukončeno v účastnické zásuvce, která je umístěna na vnější zdi domu případně bytové jednotky.

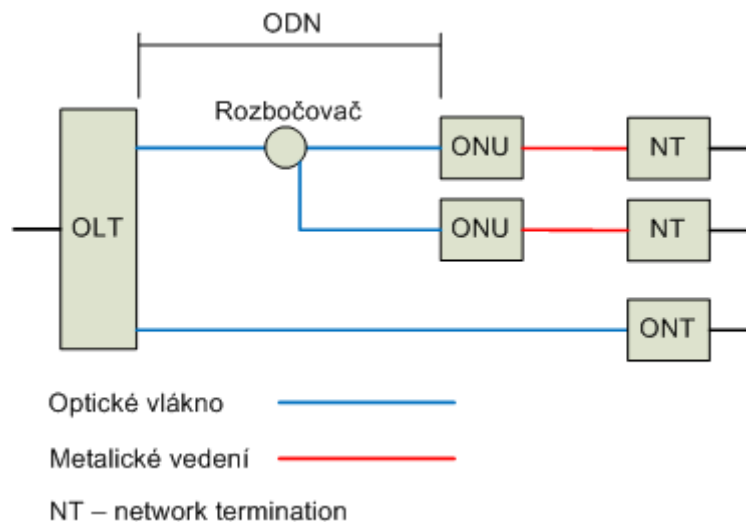


Obrázek 2.2: Rozdělení optické sítě podle ukončení vlákna FTTx

2.2 Základní funkční bloky optické přístupové sítě

Optická přístupová síť PON je tvořena několika základními bloky, které zajišťují všechny funkce potřebné pro správný provoz sítě. Rozdělení bloků a jejich popis je uveden níže. Na obrázku 2.3 jsou zobrazeny tyto bloky a jejich vzájemná návaznost.

- OLT (Optical Line Termination) – Optické linkové zakončení plní funkci rozhraní mezi vyššími sítěmi telekomunikačních služeb a přístupovou sítí; bývá připojena k páteřní síti (SDH, Ethernet, WDM).
- ODN (Optical Distribution Network) – Optickou distribuční síť tvoří všechny přenosové prostředky mezi jednotkami OLT a ONU; řadí se sem optická vlákna, optické dělicí prvky, spojky, konektory atd.
- ONT (Optical Network Termination) – Zabezpečuje funkci účastnického rozhraní mezi přístupovou sítí a koncovým zařízením účastníka, používá se u FTTH; většinou se jedná o rozvaděč poblíž budovy (datová skříň), kde se připojuje více koncových účastníků.
- ONU (Optical Network Unit) – Optická síťová jednotka plní funkci rozhraní mezi optickou a metalickou, případně bezdrátovou částí přístupové sítě; v této práci budu z důvodu zjednodušení používat označení ONU i pro ONT. [1], [3]



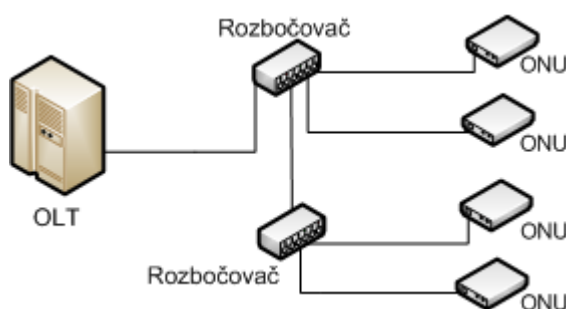
Obrázek 2.3: Návaznost jednotlivých bloků optické pasivní sítě

2.3 Typy topologií PON

V sítích PON se využívá několika základních druhů topologií. Každá topologie má různé vlastnosti, výhody a nevýhody, od kterých se odvíjí její použití v praxi. Zde jsou uvedeny tři nejčastější druhy používaných topologií. [1], [13]

- Stromová topologie

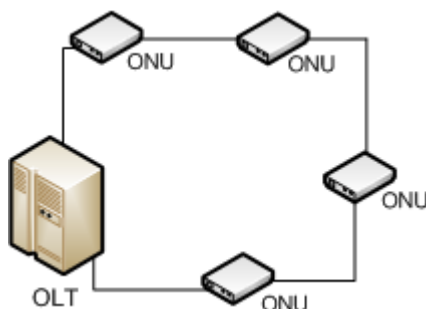
Stromová topologie je jedna z nejpoužívanějších topologií. Využívá uspořádání bod-více-bodů se využívá hlavně pro připojení domácností, topologie je zobrazena na obrázku 2.4. Největší výhodou je jednoduchá detekce problému v síti, protože k dělení signálu dochází v jednom místě.



Obrázek 2.4: Stromová topologie

- Kruhová topologie

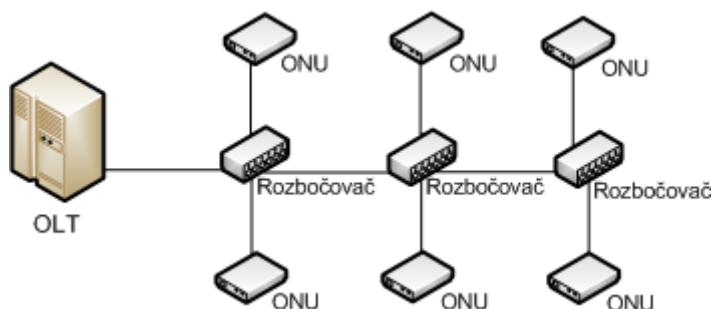
Tento typ topologie se využívá v metropolitních sítích a pro obchodní použití. Výhodou je, že v případě přerušení vlákna, je možnost dosáhnout k OLT z druhé strany, jak ukazuje obrázek 2.5. Nevýhodou je složitější zapojení, protože do každé koncové jednotky jsou připojena dvě vlákna a cena při budování topologie.



Obrázek 2.5: Kruhová topologie

- Sběrníková topologie

Využívá se pro univerzitní účely, výhodou je, že lze jednoduše přidat další koncové jednotky, nevýhodou je to, že při každém průchodu rozbočovačem vzniká útlum a nejvzdálenější koncové jednotky tak přijímají mnohem slabší signál. Další nevýhodou je omezená maximální dosažitelná vzdálenost z důvodu útlumu. Topologie je zobrazena na obrázku 2.6.

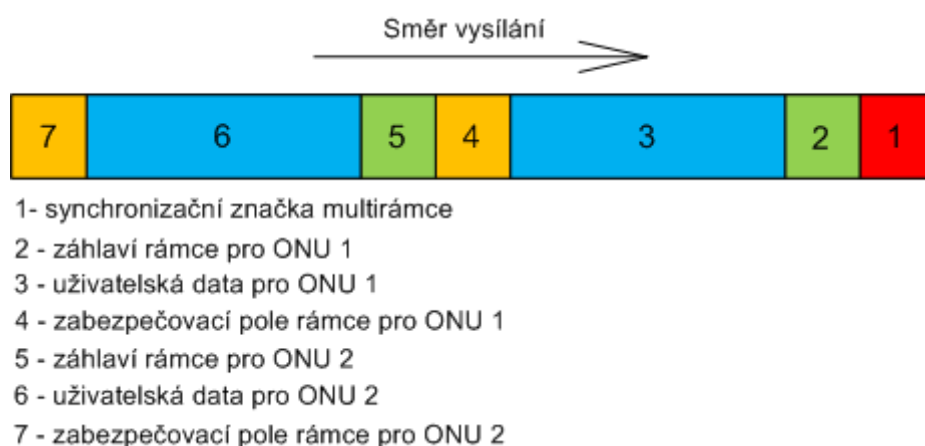


Obrázek 2.6: Sběrníková topologie

3 EPON síť

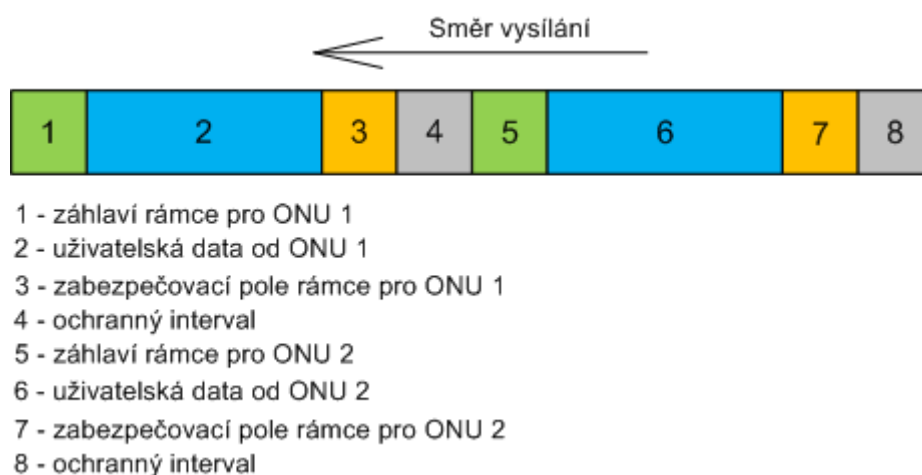
EPON (Ethernet Passive Optical Network) síť je typ pasivní optické sítě založené na Ethernet protokolu. Standardizována byla standardem IEEE 802.3. Tato síť má v dnešní době další varianty a to: EPON ver. 2 - IEEE 802.3ah, kdy síť dosahuje rychlostí 1,25 Gbit/s a 10GEPON pro síť s rychlostí 10 Gbit/s s označením IEEE 802.3av. Gigabitová verze (EPON ver. 2) síť se marketingově označuje jako GEPON (Gigabit Ethernet Passive Optical Network).

EPON patří do kategorie pasivních optických přístupových sítí a pro přenos dat využívá TDM (Time Division Multiplex) multiplexaci, jak je vidět z obrázku 3.1. Metoda multiplexování TDM je založena na principu multirámců, kde každý vysílaný multirámeček obsahuje datové příspěvky pro všechny připojené koncové jednotky. Ve směru od poskytovatele k účastníkovi každý multirámeček začíná synchronizační značkou, poté následuje záhlaví rámce jednotky ONU 1 a potom následují účastnická data. Po datech následuje zabezpečovací pole koncové jednotky ONU 1. Následně je vysíláno záhlaví rámce jednotky ONU 2 atd. [4]



Obrázek 3.1: Struktura multirámce ve směru od OLT k ONU

Ve směru od účastníka k poskytovateli je princip obdobný. Odesílaný multirámeček ovšem neobsahuje synchronizační značku a mezi jednotlivými datovými příspěvky od jednotlivých ONU jsou umístěny ochranné intervaly, které neobsahují žádná data ani značky. Znázorněno je to na obrázku 3.2. a popsáno v podkapitole 3.2. [4]



Obrázek 3.2: Struktura multirámce ve směru od ONU k OLT

3.1 Typy EPON sítí

Standard IEEE 802.3ah rozlišuje 2 druhy EPON sítí. Oba typy sítí pracují na vlnových délkách 1310 nm pro přenos od koncového uživatele k poskytovateli (upload/vzestupný směr) a 1490 nm pro směr od poskytovatele ke koncovému uživateli (download/sestupný směr).

- **EPON typ 1**

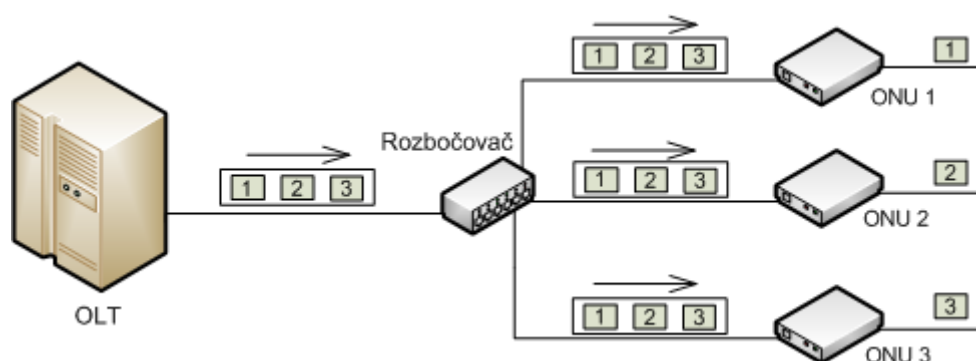
EPON typ 1 je také označován jako 1000BASE-PX10. Přenos je založen na jednom jednovidovém vlákně, které překlenuje maximální vzdálenost 10 km. Umožňuje připojit pouze 16 koncových jednotek ONU s rychlostí přenosu 1,25 Gbit/s v každém směru. Tato verze se na první pohled jeví jako neperspektivní a proto se již v praxi téměř nepoužívá.

- **EPON typ 2**

EPON typ 2 je také označován jako 1000BASE-PX20. Přenos je také jako u typu 1 založen na jednom jednovidovém vlákně, které překlenuje maximální vzdálenost 20 km. Typ 2 umožňuje připojit maximálně 32 koncových jednotek ONU. Dosahovaná rychlost je shodná s typem 1, čili 1,25 Gbit/s v každém směru přenosu. [1], [4]

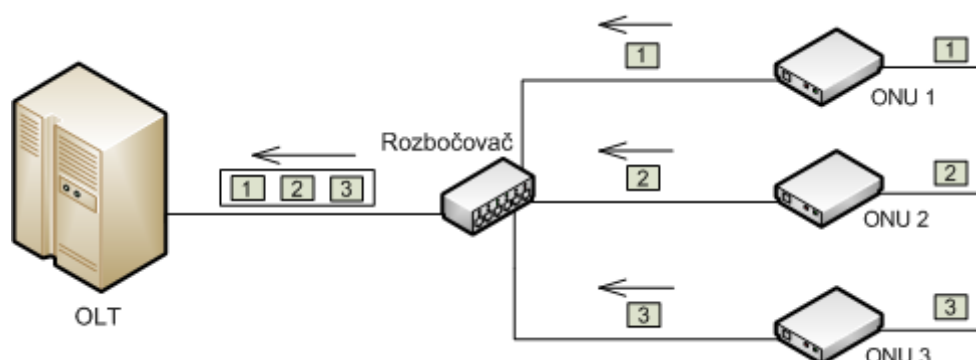
3.2 Princip přenosu v síti EPON

V sestupném směru (od OLT k ONU) vysílá jednotka OLT časový multirámec, který díky použití časového multiplexu obsahuje data pro všechny připojené koncové jednotky (ONU). Pasivní rozbočovač (splitter) rozešle tyto multirámce všem připojeným koncovým jednotkám. V koncové jednotce je potom vybrána pouze část dat, která je určena danému uživateli. Princip je zobrazen na obrázku 3.3. [4], [15]



Obrázek 3.3: Princip přenosu v síti EPON ve směru od OLT k ONU

Ve vzestupném směru (od ONU k OLT) posílá každá koncová jednotka data pouze ve vyhrazených časových intervalech, aby nedocházelo ke kolizím. Rozbočovač následně jednotlivé datové příspěvky sloučí do multirámce a opatří ochrannými intervaly. Celý multirámec je poté přenášen do OLT. Princip TDMA (Time Division Multiple Access) je přiblížen na obrázku 3.4. [4], [15]



Obrázek 3.4: Princip přenosu v síti EPON ve směru od ONU k OLT

4 WDM PON síť

WDM PON (Wavelength Division Multiplex Passive Optical Network) síť představují v současné době nejnovější řešení přenosu informací pomocí vlnově děleného multiplexu. Technologie WDM poskytuje možnost přenášet desítky navzájem oddělených vlnových délek současně po jednom optickém vlákně. To výrazně zvyšuje kapacitu přenosu vlákna, protože místo jediné vlnové délky nesoucí informace, se ve vlákně současně přenáší mnoho vlnových délek, z nichž každá nese vlastní informace.

Technologie WDM-PON se obecně rozděluje na 2 typy. Prvním typem je CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex), která se vyznačuje většími rozestupy mezi jednotlivými nosnými a nižšími náklady na provoz. Druhým typem sítě je potom DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex), která má velmi malé rozestupy mezi jednotlivými nosnými a umožňuje dosahovat větších rychlostí, ale náklady na provoz jsou výrazně vyšší.

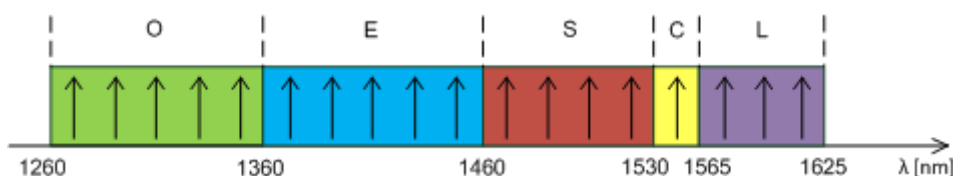
4.1 CWDM

CWDM je jedna z technologií vlnového dělení. Původně CWDM sloužila pro přenos 2 kanálů po jednom optickém vlákně. Jeden kanál se přenášel v pásmu 1310 nm a druhý v pásmu 1550 nm. V roce 2002 ITU-T standardizovala tuto technologii a byla vytvořena tabulka jednotlivých kanálů, ve které byly definovány tyto kanály, odstupy mezi nimi a tolerance kanálů. Tato varianta vlnového dělení je charakteristická svým širokým přenosovým pásmem. Využívá se u nenáročných a nízkonákladových aplikací, protože díky většímu odstupu mezi jednotlivými nosnými nevznikají tak velké nároky na používané laserové zdroje. Při provozu se zdroj zahřívá a to negativně ovlivňuje jeho vlastnosti, protože dochází ke kolísání jednotlivých vyzařovaných vlnových délek. Díky velkému odstupu mezi jednotlivými nosnými se proto obecně využívají méně kvalitní optické zdroje, které nepotřebují teplotní stabilizaci a to výrazně snižuje náklady na výstavbu a celkový provoz systému. Technologie CWDM je také někdy označována jako „hrubé vlnové dělení“ z toho důvodu, že má větší rozestupy mezi kanály než DWDM.

4.1.1 Používané vlnové délky

Pro CWDM byly podle standardu ITU-T G.694.2 definovány jednotlivé kanály s první nosnou 1271 nm a s poslední nosnou 1611 nm. Mezi jednotlivými nosnými je definován odstup 2,5 THz (20 nm) s tolerancí nosné 812,5 GHz (6,5 nm). To umožnilo vytvořit 18 nezávislých provozních kanálů. Jednotlivé kanály jsou rozděleny do několika pásem. Na obrázku 4.1 je toto rozdělení znázorněno graficky. [5], [6]

- Pásmo O (Original)
 - původní okno, pro jednokanálové systémy nebo CWDM
 - vlnové délky od 1260 nm do 1360 nm
 - obsahuje 5 kanálů
- Pásmo E (Extended):
 - rozšířené okno, pro CWDM systémy, v tomto kanále se počítá s vláknem s potlačenými OH ionty
 - vlnové délky od 1360 nm do 1460 nm
 - obsahuje 5 kanálů
- Pásmo S (Short)
 - krátké okno, pro budoucí DWDM nebo CWMD systémy
 - vlnové délky od 1460 nm do 1530 nm
 - obsahuje 4 kanály
- Pásmo C (Conventional)
 - standardní okno, pro současné DWDM nebo CWMD systémy
 - vlnové délky od 1530 nm do 1565 nm
 - obsahuje 1 kanál
- Pásmo L (Long)
 - dlouhé okno, pro současné DWDM nebo CWMD systémy
 - vlnové délky od 1565 nm do 1625 nm
 - obsahuje 3 kanály



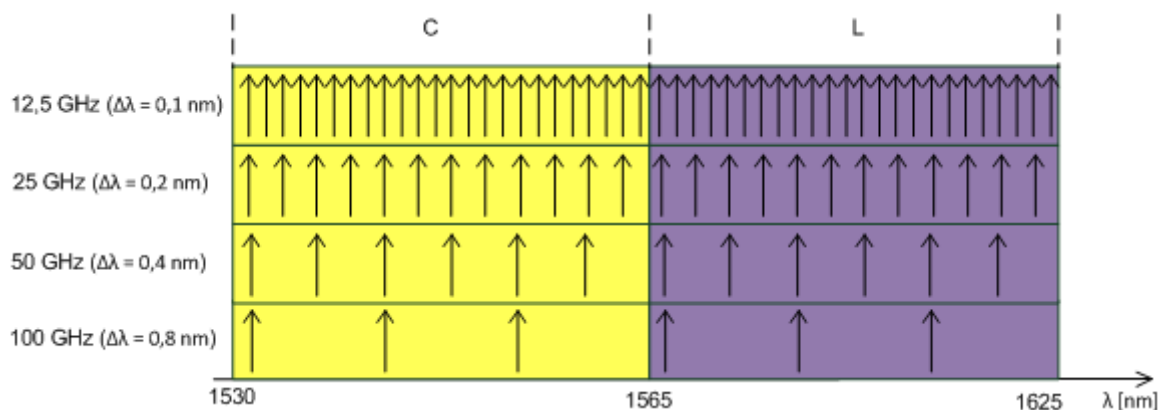
Obrázek 4.1: Spektrum CWDM systému s rozestupem 20 nm mezi kanály

4.2 DWDM

Technologie DWDM používá menší odstupy mezi jednotlivými nosnými, proto se jí také někdy říká „husté vlnové dělení“. Tyto menší rozestupy umožňují do provozního pásma umístit větší počet kanálů. Tato technologie vyžaduje použití přesné řídicí elektroniky a teplotně stabilizovaných optických zdrojů, právě z důvodů velmi malých rozestupů mezi kanály. To je důvodem vyšší ceny tohoto systému oproti CWDM. Při provozu se zdroj zahřívá a dochází ke kolísání vysílaných vlnových délek. Pokud by zdroj nebyl teplotně stabilizován, docházelo by k tomu, že by nevysílal konstantně na požadované vlnové délce, ale zasahoval by i do sousedních vlnových délek a signál by byl znehodnocen.

4.2.1 Používané vlnové délky

Pro DWDM byl vydán standard ITU-T G.694.1, ve kterém jsou definovány frekvenční mřížky pro jednotlivé kanály a rozestupy mezi nimi. DWDM technologie umožňuje používat několik různých rozestupů mezi kanály a to 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz a 100 GHz, což odpovídá rozestupům 0,1 nm, 0,2 nm, 0,4 nm a 0,8 nm, jak je ukázáno na obrázku 4.2. Využívají se pouze přenosová pásma C a L. [14]



Obrázek 4.2: Spektrum DWDM systému s různými rozestupy mezi kanály

4.3 Varianty přenosu signálu ve WDM PON

V technologii WDM PON se mohou využívat 3 různé metody přenosu optického signálu k účastníkovi.

První metodou je metoda, která využívá pasivního optického rozbočovače (splitteru) a pevně přiřazených vlnových délek. Tato metoda se jeví jako cenově nejlevnější. Na druhou stranu je potřeba pro přenos dat zajistit šifrování a z důvodu pevného přiřazení vlnových délek dochází k neefektivnímu rozdělení přenosové kapacity.

Druhá metoda využívá směrové odbočnice AWG (Arrayed Waveguide Grating) místo splitteru a vydělování vlnových délek.

Třetí metoda kombinuje obě předchozí varianty přenosu dohromady.

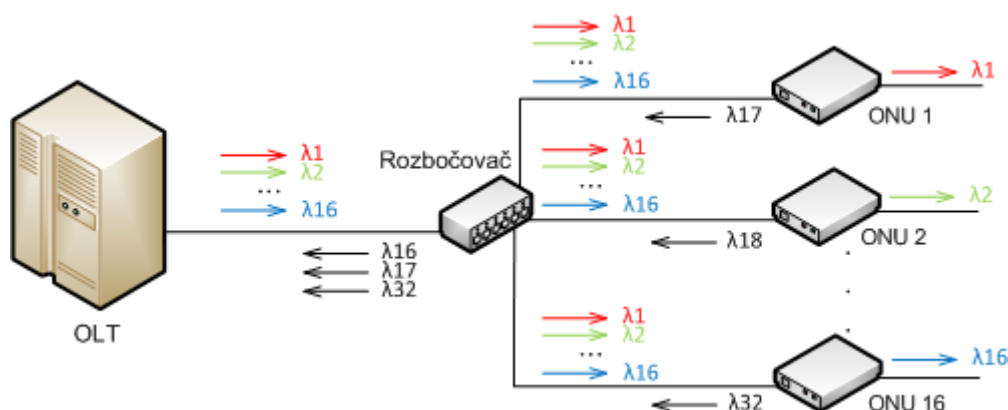
4.3.1 Metoda s pevně přiřazenými vlnovými délkami

Tato varianta pracuje na tom principu, že každá koncová jednotka ONU má pevně přidělenou vlnovou délku. Budeme-li uvažovat síť, kde je připojeno 16 koncových jednotek ONU, bude pro provoz takovéto sítě potřeba 32 vlnových délek.

V sestupném směru přenosu (z OLT do ONU) budou použity vlnové délky λ_1 až λ_{16} , které se přenášejí společně po jednom vlákne až do pasivního rozbočovače. Na těchto vlnových délkách

koncové jednotky data přijímají. Pasivní rozbočovač bude mít 16 výstupů a z každého výstupu povede vlákno do koncové jednotky. Signál na vstupu rozbočovače se rozdělí do všech odchozích směrů a každá koncová jednotka přijme všechny vysílané vlnové délky. Každá koncová jednotka obsahuje nastavený pasivní WDM filtr, který potom vydělí vlnovou délku, která jí byla určena. Zde ovšem vzniká bezpečnostní problém. Protože každá koncová jednotka přijímá všechny vysílané vlnové délky, mohlo by dojít k odposlechu přenášených dat. Proto se data musí šifrovat.

Ve vzestupném směru (od ONU k OLT) má každá koncová jednotka přidělenou vlnovou délku v rozsahu λ_{17} až λ_{32} , na které vysílá data. Vysílané vlnové délky se potom spojí v rozbočovači a společně jsou přenášeny do OLT. Z hlediska architektury se jedná o síť typu bod-bod, protože každá koncová jednotka komunikuje s OLT individuálně na své vlnové délce. Zobrazeno je to na obrázku 4.3. [6]



Obrázek 4.3: Princip přenosu pomocí rozbočovače

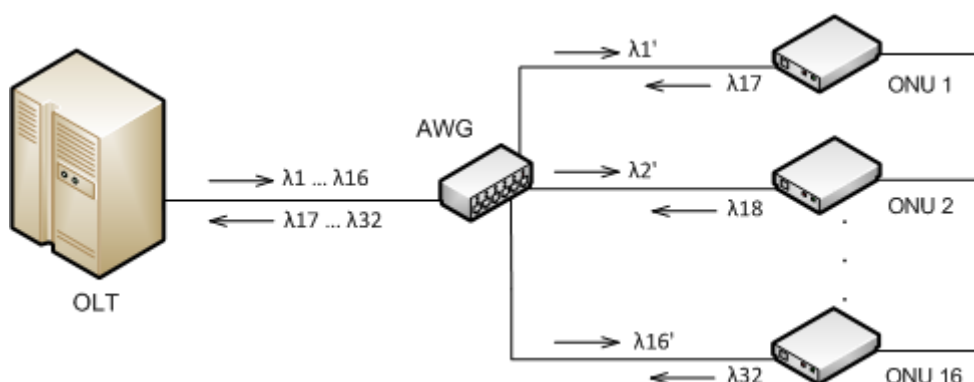
- Výhody
 - jednoduchost a cena pasivního rozbočovače.
- Nevýhody
 - vysoký vložný útlum,
 - v sestupném směru je potřeba data šifrovat, protože přicházející data sdílejí všechny koncové jednotky,
 - vlnové délky jsou pevně přiděleny a není možné nevyužité vlnové délky nabídnout jiné koncové jednotce.

4.3.2 Metoda s vydělováním vlnových délek

Tato varianta přenosu pracuje na principu vydělování vlnových délek pomocí metody AWG za použití směrových odbočnic. U této metody odpadá nutnost šifrovat jednotlivá účastnická data, protože ke každé koncové jednotce se již nešíří všechny vlnové délky jako v předchozím případě, ale pouze jedna vlnová délka, která je pro danou koncovou jednotku určena.

Pro přehlednost budeme uvažovat opět síť o 16 připojených koncových jednotkách. V sestupném směru (od OLT k ONU) přichází signál opět ve formě vlnového multiplexu λ_1 až λ_{16} po jednom vlákně až na vstup směrové odbočnice AWG. Pomocí metody AWG jsou jednotlivé vlnové délky vyděleny a ke koncovým jednotkám se šíří signál na vlnové délce λ . Každá koncová jednotka přijímá pouze signál na vlnové délce, kterou dostala přidělenou od AWG. Z tohoto důvodu také odpadá nutnost mít v koncové jednotce na vstupu WDM filtr, což snižuje celkový útlum signálu.

Ve vzestupném směru (od ONU do OLT) je princip přenosu stejný jako u metody s pasivním rozbočovačem, tedy komunikace probíhá na vlnových délkách λ_{17} až λ_{32} . Princip ukazuje obrázek 4.4. [6]



Obrázek 4.4: Princip přenosu pomocí AWG

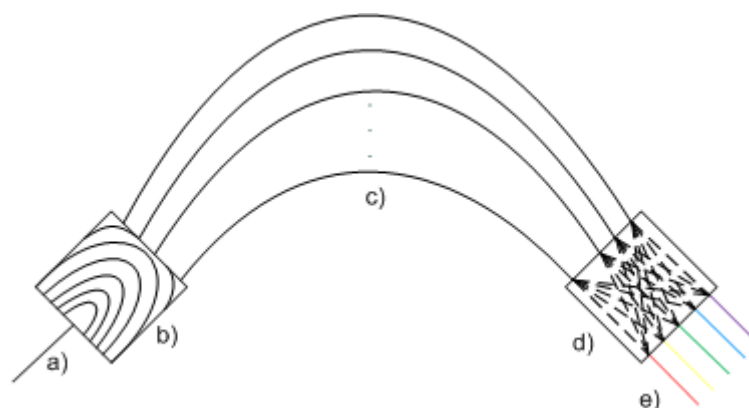
Princip funkce AWG

Ve WDM sítích se AWG používá jako multiplexor a demultiplexor. AWG pracuje na principu ohybu (difrakce) světla. Konstrukce AWG se skládá z několika částí a je zobrazena na obrázku 4.5. Jak je z obrázku vidět, hlavní části tvoří dva vazební články a pole planárních vlnovodů. Každý vlnovod má pevně nastavenou délku, a to tak, že rozdíl mezi dvěma sousedními vlnovody je ΔL .



Obrázek 4.5: Schéma AWG

Princip dělení světla pokud AWG pracuje jako demultiplexor (obrázek 4.6) je následující. Svazek světla, který obsahuje několik vlnových délek je přiveden na vstup do prvního vazebního článu (a). Tam dojde k difrakci světla, kdy se každá vlnová délka rozdělí do několika kopií. Na všechny výstupy z vazebního článu je potom přivedena každá vlnová délka (b). Díky tomu, že každý vlnovod se liší jinou délkou (ΔL), světelný svazek v každém vlnovodu urazí jinou vzdálenost a na vstup druhého vazebního článu se dostane s jiným fázovým posuvem (c). Velikost fázového posuvu závisí také na vlnové délce světla. Na vstupu druhého vazebního článu dojde opět k difrakci světla, kdy se ze všech vstupů každá vlnová délka dostane na všechny výstupy (d). Díky fázovému posuvu dojde k tomu, že na každém výstupu dojde k interferenci pouze jedné vlnové délky (e). [6], [7], [8], [15]



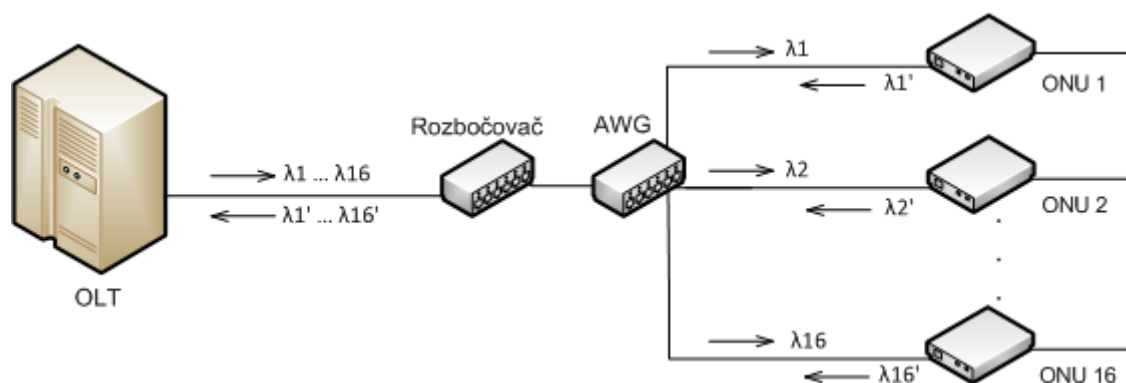
Obrázek 4.6: Princip činnosti AWG

Jako multiplexor pracuje AWG na stejném principu jako při demultiplexování s tím rozdílem, že vstupem je několik vláken s různými vlnovými délkami a výstupem je jediné vlákno, po kterém se přenášejí všechny vlnové délky.

- Výhody
 - AWG má menší vložený útlum (< 3 dB) než pasivní rozbočovač,
 - odstranění pasivního WDM filtru na vstupu koncové jednotky ONU, což snižuje útlum.
- Nevýhody
 - AWG je teplotně závislý, musí se udržovat stabilní pracovní teplota.

4.3.3 Metoda kombinace pasivních rozbočovačů a AWG

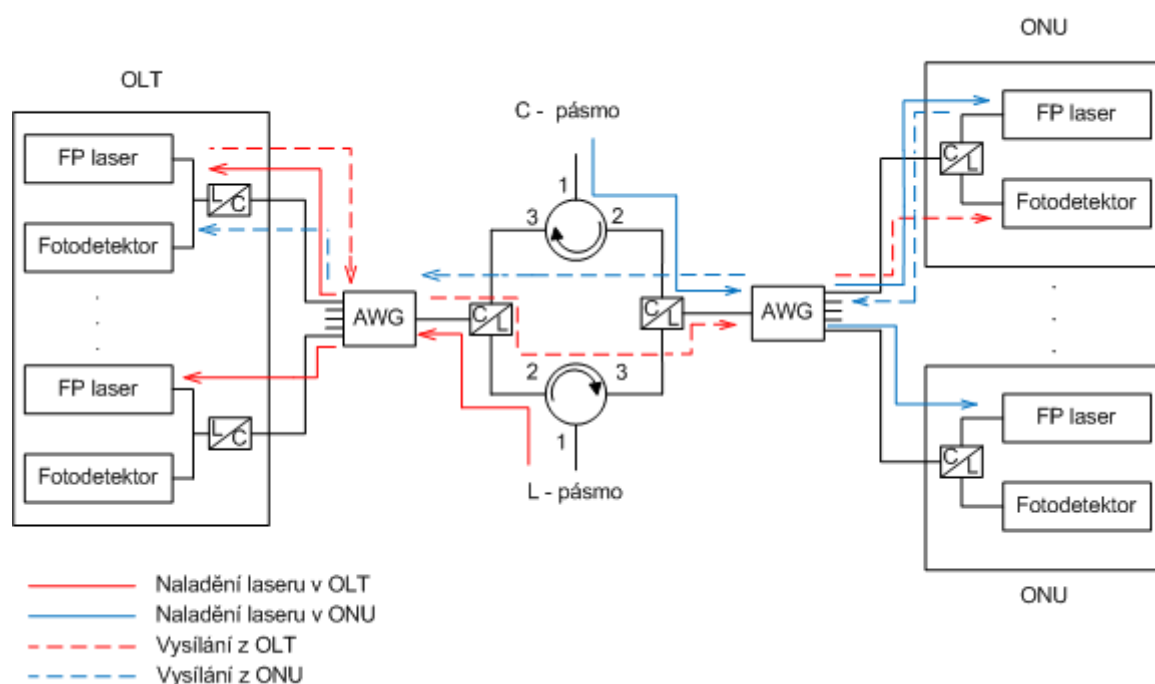
Tato metoda kombinuje obě předchozí metody přenosu do jedné. Využívá se kaskádní zapojení pasivních optických rozbočovačů i směrových odbočnic. Směrové odbočnice jsou připojeny na výstupy pasivního rozbočovače. Zapojením několika AWG odbočnic do kaskády lze dosáhnout větší přesnosti při vydělování jednotlivých vlnových délek. Použití univerzálních koncových jednotek společně s volitelnými vlnovými délkami umožňuje přidělovat koncovým jednotkám kanály podle aktuálních požadavků. Znázorněno je to na obrázku 4.7. [6]



Obrázek 4.7: Princip přenosu pomocí rozbočovače a AWG

4.4 Princip přiřazení vlnových délek ve WDM PON

Vzdálené přiřazení pracovních vlnových délek ve WDM PON sítích je možné díky vlastnosti Fabry-Perotova laseru, který se umí naladit na určitou vlnovou délku a poté tuto vlnovou délku zesilovat a vysílat. Na obrázku 4.8 je přiblížen princip tohoto přiřazování vlnových délek. Jako první se pomocí cirkulátoru a AWG filtru naladí z L-pásma jednotlivé Fabry-Perotovy lasery na dané vlnové délky na straně OLT (sestupný směr - červená). Na těchto vlnových délkách potom probíhá synchronizace a poté komunikace s ONU jednotkami. V případě vysílání dat z ONU jednotek směrem na OLT (vzestupný směr - modrá) se pomocí druhého cirkulátoru naladí Fabry-Perotovy lasery v jednotlivých ONU na jednotlivé vlnové délky z C-pásma, na kterých probíhá komunikace v opačném směru.



Obrázek 4.8: Přidělování vlnových délek ve WDM PON

4.5 Zdroje optického záření

Zdroje optického záření jsou důležitou součástí optických přístupových sítí. Jejich úkolem je generovat optický signál na požadované vlnové délce. Pro nízké přenosové rychlosti (do 100 Mbit/s) se dají využít LED (Light Emitting Diode) zdroje. Se zvyšujícími se nároky na rychlost přenosu dat se pro vysoké rychlosti (od 100 Mbit/s výše) musí používat LD (Laser Diode) zdroje.

Požadavky na optické zdroje používané ve WDM:

- dostatečný výkon, aby byl signál na konci trasy detekovatelný,
- dosažení požadované přenosové rychlosti,
- nevykazovat šum,
- úzká a stabilní spektrální čára jednotlivých kanálů,
- necitlivost na změny teploty a dalších okolních vlivů,
- spolehlivost,
- nízká cena,
- dlouhá životnost.

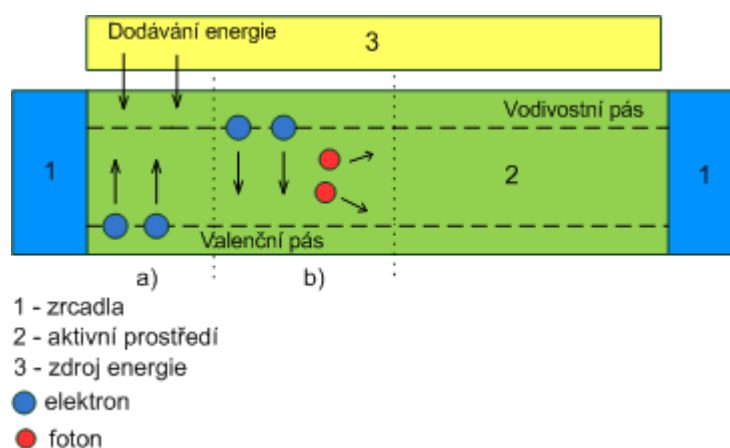
4.5.1 Princip funkce polovodičového laseru

Laser je zkratkou pro Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, česky zesílení světla stimulovanou emisí záření.

Podmínky pro vznik laserového světla jsou tyto:

- inverze populace,
- stimulovaná emise,
- kladná zpětná vazba,
- dodávka energie.

Laser se skládá ze zdroje energie, aktivního prostředí (polovodičový substrát s PN přechody) a dvou odrazných zrcadel (rezonátor). Princip vzniku laserového světla je takový, že zdroj energie dodává proud do aktivního prostředí. Díky čerpané energii se elektrony vybudí do excitovaného stavu, to znamená, že přejdou z valenčního energetického pásu do vodivostního energetického pásu, obrázek 4.9 a). Tyto pásy jsou širší než energetické hladiny a elektrony v nich mohou být umístěny po celé jejich šířce. Při návratu elektronů z excitovaného stavu zpět do valenčního pásu se tyto elektrony na určitý čas zdrží na metastabilní hladině. Když potom přejdou do valenčního pásu, vydají energii ve formě fotonů, které se šíří všemi směry, obrázek 4.9 b).

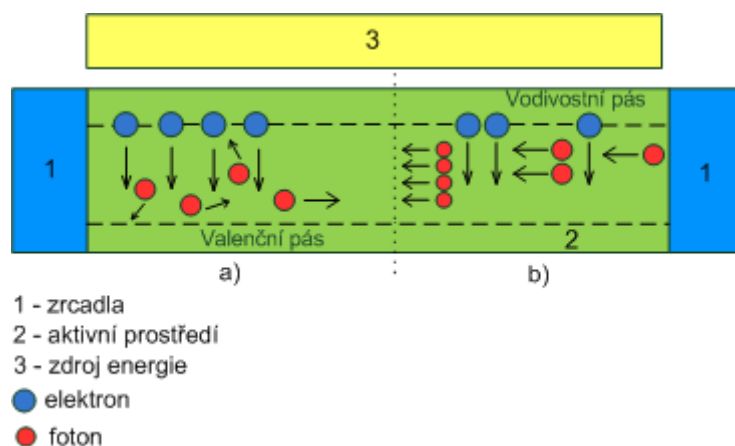


Obrázek 4.9: Struktura a princip laseru, vznik fotonu

K tomu aby došlo k zářivé rekombinaci (vzniku fotonu), je potřeba dodávat dostatečně velký proud po určitou dobu. Tomuto proudu se říká prahový proud. Při dodání proudu menšího než je prahový proud, dochází pouze ke spontánní emisi, kdy generované fotony mají náhodný směr a laser tak pracuje v režimu elektroluminiscenční diody. Při dodání prahového proudu dojde k saturaci, čili tomu, že ztráty vzniklé spontánní emisí jsou vykompenzovány. Když je dodán větší proud než prahový (laser začne pracovat v režimu laseru), dojde k inverzi populace. To znamená,

že počet elektronů v excitovaném stavu je vyšší než jejich počet ve valenčním pásu. Jinými slovy, materiál je ve stavu, kdy je schopen emitovat více energie než absorbovat.

Fotony vzniklé spontánní emisí, které mají jiný směr šíření než kolmý na zrcadlo, jsou vyvážány, a tím vznikají ztráty. Pouze malá část vzniklých fotonů se šíří směrem kolmým na odrazné zrcadlo, jak jde vidět z obrázku 4.10 a). Foton s kolmou dráhou na zrcadlo projde aktivním prostředím, odrazí se od zrcadla a přes aktivní prostředí se vrací zpět. Pokud se tento stimulující foton šíří v určité vzdálenosti vůči elektronům, které jsou na metastabilní hladině, tak svým průchodem donutí elektron, aby sestoupil do valenčního pásu, a tím se vytvoří další foton, který má stejný směr a fázový posuv, jak ukazuje obrázek 4.10 b). Protože platí zákon o zachování energie, tak při dodávání konstantního proudu vzniká pořád stejný počet rekombinujících elektronů. Ovšem díky tomu, že vznikající fotony jsou nuceny šířit se stejným směrem, dochází k tomu, že se počet ztrátových fotonů (fotonů s jiným směrem šíření) snižuje. Takto dojde ke kopírovacímu efektu, kdy vzniká velké množství fotonů se stejným směrem šíření. [8], [16]



Obrázek 4.10: Struktura a princip laseru, vznik laserového světla

Jedno ze zrcadel je polopropustné a skrz něj se fotony dostanou ve formě světelného svazku z laseru ven. Výsledné laserové světlo je koherentní, monochromatické, má vysokou intenzitu a úzkou spektrální čáru.

4.5.2 Fabry-Perotův laser

Tento typ laseru je nejjednodušším typem laseru. Odrazné plochy na koncích aktivní oblasti tvoří zrcadla. Fabry-Perotův laser generuje kromě požadované vlnové délky také několik nežádoucích postranních spektrálních čar. Tím je generované spektrum široké asi 5 nm. Také výstupní paprsek je velmi slabý, protože většina fotonů zůstává uvnitř laseru, kde podporují stimulovanou emisi. [7], [16]

4.5.3 DFB laser

DFB (Distributed FeedBack Laser) je typ laseru, kde jsou zrcadla na koncích rezonátoru nahrazena difrakční mřížkou, která je tam naleptána. Za cenu trochu komplikovanější struktury je získáno mnoho výhod. Difrakční mřížka funguje jako optický filtr a tím se docílí toho, že laser generuje světelný svazek o úzké spektrální čáře (až 0,0001 nm) v C a L pásmu. Generovaná vlnová délka světla je dána periodou mřížky. Další výhodou je například menší disperze a stabilita. DFB lasery jsou obvykle využívány jako zdroj záření pro DWDM systémy. [7], [16]

4.5.4 Laditelný laser

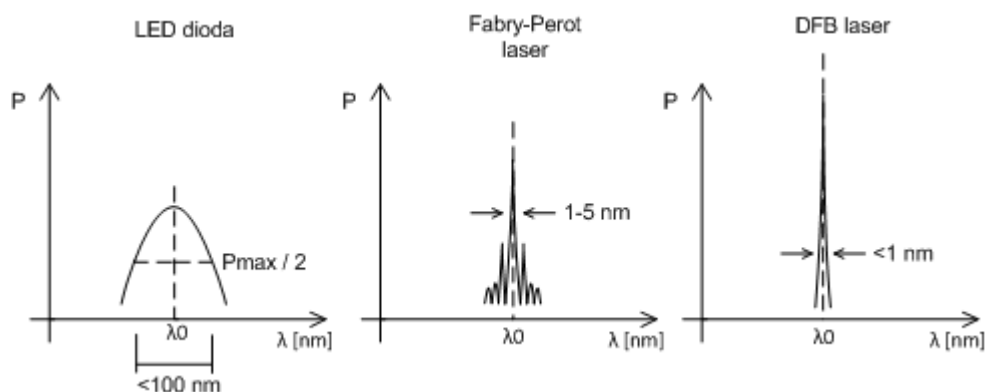
Dnes musí mít poskytovatel DWDM jeden laser pro každou vlnovou délku, na které vysílá, což znatelně zvyšuje náklady. Laditelný laser tento problém řeší. Největší výhodou laditelného laseru je to, že jeden laser dokáže pokrýt všechny požadované vlnové délky. Tento typ laseru umožňuje měnit vlnovou délku, na které vysílá, tím, že se mění napětí, které se na něj přivádí. Se změnou napětí se mění index lomu, a tím se mění i generovaná vlnová délka. Další možností, jak měnit vlnové délky je ovládání teploty laseru, protože lasery jsou náchylné na změny teplot, kdy se při změně teploty změni vysílaná vlnová délka. [7], [16]

4.5.5 Širokospektrální laserový zdroj s AWG filtrem

Další typ zdroje, který lze využít ve WDM systémech, je širokospektrální zdroj s AWG filtrem. V tomto případě se jednotlivých vlnových délek dosahuje jejich vydělováním z širokospektrálního světelného svazku. Laser tedy nevyzařuje světlo pouze na určité vlnové délce, ale poskytuje široké spektrum vlnových délek. Z tohoto spektra jsou následně pomocí AWG filtru vyděleny jednotlivé požadované vlnové délky. Výhodou je snadná implementace a nízká cena. Nevýhodou je nízká modulační rychlost a nízký výkon. [16]

4.5.6 Spektra různých druhů diod

Spektrum LED je relativně široké (okolo 100 nm) a nehodí se proto pro použití v DWDM systémech, které mají vysoké nároky na šířku spektrální čáry. Spektrum laserové diody je velmi úzké, pohybuje se podle typu od 5 nm po 0,0001 nm. Na obrázku 4.11 jsou zobrazena spektra LED diody, Fabry-Perotova laseru a DFB laseru. [7]



Obrázek 4.11: Spektra různých druhů zdrojů

4.6 Detektory optického záření

Koncové jednotky ONU musí obsahovat fotodetektor, aby byly schopny detekovat, zachytit a správně zpracovat přicházející signál. Dále také musí převést optický signál na elektrický. Dva nejčastěji používané typy fotodetektorů jsou PIN (P-type, intrinsic, N-type) a ADP (Avalanche Photo Diode). Dnes se ve větší míře začínají prosazovat na dlouhých trasách fotodetektory APD a to hlavně z důvodu jejich větší citlivosti, což je zapotřebí u DWDM sítí. Protože zachytávaný optický signál je na konci trasy už většinou velmi slabý, fotodetektory musí mít dostatečnou citlivost. Citlivost fotodetektorů je ovlivněna hlavně šumy, které na nich vznikají. Na největším zhoršení citlivosti se podílí hlavně výstřelový a tepelný šum.

Požadavky na fotodetektory:

- velká věrnost konverze optického signálu na elektrický,
- velká citlivost v oblasti přijímaných vlnových délek,
- nízký šum, nízký temný proud,
- stabilita,
- nízká cena,
- spolehlivost.

4.6.1 Výstřelový šum

Tento šum vzniká v důsledku toho, že množství fotonů emitované zdrojem není konstantní, ale neustále kolísá. Výstřelový šum tedy není závislý na kvalitě fotodetektoru a je neodstranitelný. Právě z důvodu, že na konci optické trasy dopadá na fotodetektor velmi malé množství světla, stává se tento šum významným zdrojem rušení. Čím je tento šum nižší, tím menší rušení na detektoru vzniká. [9]

4.6.2 Temný proud

Temný proud se řadí k parametrům, které mají vliv na citlivost fotodetektorů. Temný proud je generován detektorem během doby, kdy na něj nedopadá světlo. Stejně jako výstřelový šum je neodstranitelný. Občas se řadí mezi výstřelový šum. Obecně mají různé materiály použité ve fotodetektorech různé temné proudy. Například křemíkové fotodiody mají tento proud v rozmezí 1 až 10 nA, germániové od 50 do 500 nA a InGaAs fotodetektory mají hodnoty temného proudu v rozsahu od 1 do 20 nA. Platí, že čím menší temný proud, tím menší rušení vzniká. [9]

4.6.3 Tepelný šum

Tepelný šum na fotodiodě vzniká v důsledku pohybu elektronů uvnitř elektrického vodiče, ke kterým dochází bez ohledu na přiložené napětí. Tento šum se nedá odstranit, ale lze ho ovlivnit použitým rezistorem. Stejně jako u předchozích zmíněných parametrů platí, že čím je tepelný šum menší, tím je citlivost větší. [9]

Tepelný šum ve fotodiodě je definován jako:

$$i_{th}(rms) = \sqrt{\frac{4kTB}{R_L}} \quad [A] \quad (4.1)$$

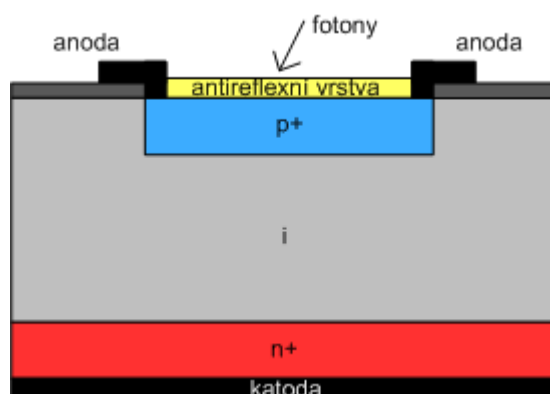
kde K je Boltzmanova konstanta, T je teplota v Kelvinech, B je šířka pásma, R_L je zátěžový odpor.

Často se tento vztah převádí na tzv. normalizovaný tepelný šum:

$$i_{thN}(rms) = \frac{i_{th}(rms)}{\sqrt{B}} = \sqrt{\frac{4kT}{R_L}} \quad [A * Hz^{-1/2}] \quad (4.2)$$

4.6.4 Fotodetektor PIN

Se zvětšujícími se nároky na optické přístupové sítě a přenosové rychlosti byl vyvinut fotodetektor PIN. Ten se dnes využívá ve všech vysokorychlostních přenosech. Fotodetektor PIN se od klasických fotodiod typu PN liší tím, že mezi silně dotované oblasti P a N je vložena speciální slabě dotovaná intrinsická vrstva I, tvořená vlastním polovodičem. Tato vrstva I zvyšuje citlivost a účinnost fotodetektoru. Oblasti P a N jsou relativně tenké oproti relativně silné vrstvě I. Schéma PIN fotodetektoru je vidět na obrázku 4.12. Princip funkce spočívá v tom, že na oblast P je přivedeno záporné napětí, na oblast N je potom přivedeno kladné napětí. Toto uspořádání vytváří uvnitř vrstvy I elektrické pole. Fotodetektor je vyroben tak, aby při dopadu fotonu na detektor tento foton přešel rovnou až do vyprázdněné oblasti I. Při dopadu fotonu do vyprázdněné oblasti vznikne pár elektron-díra, které jsou přitahovány ke svým opačným pólům. Tak vzniká měřitelný elektrický proud, který je úměrný množství dopadajícího světla. Takto se v ONU jednotce převádí dopadající optický signál na elektrický proud, který je potom dále zpracováván. Fotodetektory PIN nemají na rozdíl od APD vnitřní zisk. [7], [10], [11], [16]



Obrázek 4.12: Schéma fotodetektoru PIN

PIN fotodetektory se vyrábějí z několika typů materiálů, na nichž závisí jejich vlastnosti, jako například detekované vlnové délky, rychlost atd.

- Si – křemíkové fotodetektory mají nízkou hodnotu temného proudu, vysokou rychlost, detekované vlnové délky jsou od 400 nm až 1000 nm, nejlepší citlivost vykazují pro vlnové délky okolo 800 nm - 900 nm
- Ge – germániové detektory mají velkou hodnotu temného proudu, malou rychlost, detekované vlnové délky se nacházejí v rozmezí od 900 nm do 1600 nm, nejlepší citlivost vykazují pro vlnové délky okolo 1440 nm - 1500 nm
- InGaAsP – jsou drahé, mají nízký temný proud, vysokou rychlost, detekované vlnové délky od 1000 nm až 1350 nm, nejlepší citlivost vykazují pro vlnové délky okolo 1100 nm - 1300 nm
- InGaAs – jsou drahé, mají nízký temný proud, vysokou rychlost, detekované vlnové délky od 900 nm až 1700 nm, nejlepší citlivost vykazují pro vlnové délky okolo 1300 nm - 1600 nm [10]

4.6.5 Fotodetektor APD

Fotodetektor APD je konstrukčně stejný jako fotodetektor PIN a v principu pracuje stejně. Podstatným rozdílem je to, že je na něj přivedeno velmi velké napětí (100 až 200 V), které generuje mnohem silnější elektrické pole v I vrstvě. Vnitřní multiplikační zisk M je závislý na tom, jak velké napětí je na fotodetektor přivedeno. Obecně platí, že čím větší napětí, tím větší je zisk. Díky silnému elektrickému poli mají páry elektron-díra, vytvořené dopadajícím fotonem, mnohem větší energii a svým pohybem směrem k elektrodám tak vyvolávají vytváření dalších párů. Jeden dopadající foton už negeneruje pouze jeden pár elektron-díra, ale mnohem více. Dochází tím k lavinovému efektu a velikost procházejícího proudu se tak zvyšuje. Díky tomu mají fotodetektory APD oproti fotodetektorům PIN mnohem větší citlivost. Fotodetektory APD se proto využívají hlavně tam, kde je zapotřebí velmi velké citlivosti detektorů a na trasách s velkými přenosovými rychlostmi. [16]

- Si – křemíkové APD fotodetektory detekují vlnové délky od 450 nm do 1000 nm, nejlépe detekovatelné okolo 600 nm - 800 nm, multiplikační faktor se pohybuje od 50 do 1000
- InGaAs a Ge – tyto APD fotodetektory detekují vlnové délky od 900 nm do 1700 nm, multiplikační faktor se pohybuje od 10 do 40 [7], [12]

5 Simulace komunikace GEPON a WDM PON po jednom vlákně

Simulace probíhala ve vývojovém prostředí Optiwave Optisystem 11, který se zaměřuje na simulace optických sítí.

5.1 Popis sítě a její parametry

Při simulaci byla nastavena přenosová rychlost pro WDM PON na 100 Mbit/s pro jeden kanál. Při testování sítě bylo využito kódování NRZ (Not Return to Zero) a RZ (Return to Zero) pro síť WDM PON a kódování RZ pro síť GEPON.

5.1.1 Parametry WDM PON sítě

Ve směru od provozovatele k účastníkovi (sestupný směr) je využito L pásmo. V opačném směru (vzestupný směr) je využito C pásmo. Výkon laserů pro ladění Fabry-Perotových laserů na straně ONU je nastaven na 3,16 mW (5 dBm).

5.1.2 Parametry GEPON sítě

Jako OLT bylo použito v simulaci řešení EAST 1100 od firmy LG-Ericsson. Na straně OLT je vysílač s výkonem 1,58 mW (2 dBm) a přijímač s citlivostí -30 dBm. Jako ONU jednotka byla simulována ISCOM HT 803-1GE od firmy RAISECOM s vysílačem o výkonu 1,26 mW (1 dBm) a citlivostí -27 dBm.

5.1.3 Optické vlákno

Jako optické vlákno je simulováno jednomódové vlákno G652.D ESMF od firmy DRAKA jehož parametry jsou nastaveny podle katalogového listu. V simulaci probíhá provoz oběma směry, proto je zvoleno dvojsměrné vlákno. Protože WDM PON a GEPON pracují na různých vlnových délkách, simulace probíhala s různým nastavením parametrů vlákna pro jednotlivé sítě.

- WDM PON (C a L pásma)
 - útlum vlákna = 0,2 dB/km
 - chromatická disperze = 18 ps/(nm*km)

- GEPON (1310 nm)
 - útlum vlákna = 0,34 dB/km
 - chromatická disperze = 3 ps/(nm*km)

- GEPON (1490 nm)
 - útlum vlákna = 0,25 dB/km
 - chromatická disperze = 16 ps/(nm*km)

5.1.4 Fotodetektory

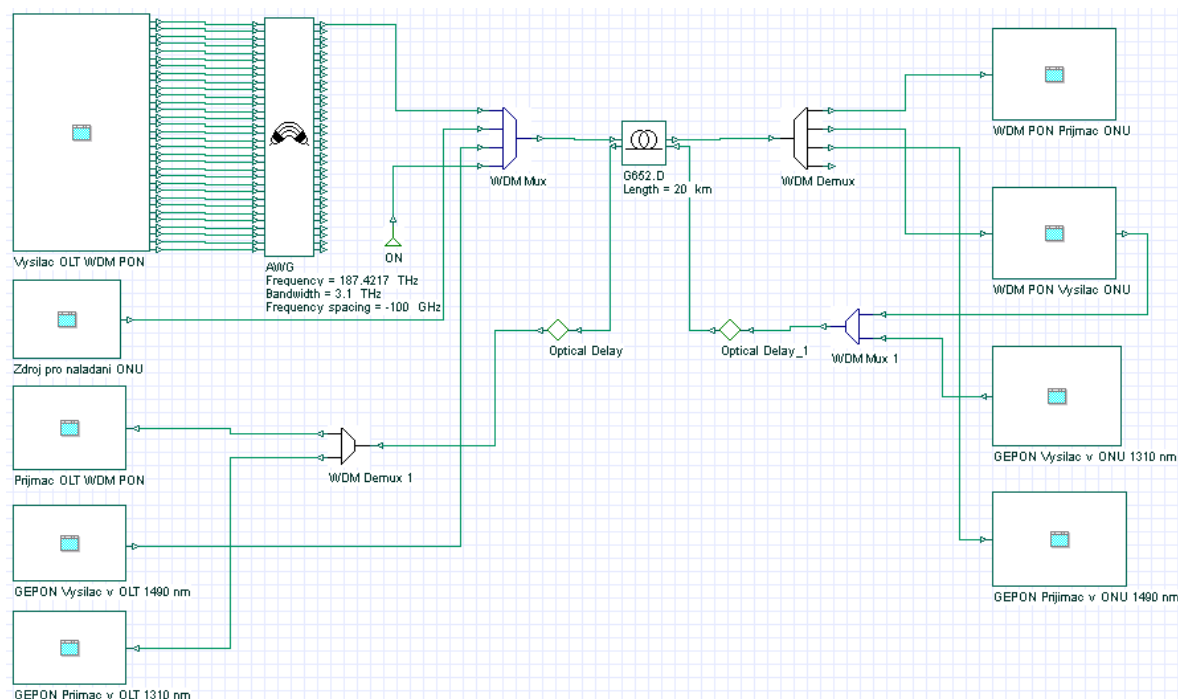
V simulaci jsou použity fotodetektory PIN FGA21, které jsou nastaveny podle katalogového listu. Temný proud je nastaven na 200 nA, tepelný šum byl vypočítán podle vzorce (4.2). Citlivost fotodetektoru se mění s vlnovou délkou a proto je zohledněna jak pro WDM PON, tak i pro GEPON síť.

5.2 Návrh sítě v Optiwave Optisystem 11

Následující část práce se zabývá popisem a nastavením vytvořeného schématu zapojení. Protože se jedná o rozsáhlé schéma, bylo rozděleno do několika bloků pro snadnější orientaci. Jednotlivé bloky jsou popsány níže. Jedná se o schéma WDM PON a GEPON sítě, které jsou současně provozovány na jednom optickém vlákně.

5.2.1 Blokové schéma sítě

Na obrázku 5.1 se nachází blokové schéma zapojení sítě, které se skládá z několika částí. Vlevo od optického vlákna se nachází OLT, které obsahuje několik bloků. Tyto bloky jsou popsány níže. V pravé části od vlákna se nachází přijímací jednotky ONU, které se opět skládají z několika bloků. Obě komunikující strany jsou propojeny optickým vláknem. Z důvodu přehlednosti byly ze schémat odstraněny měřicí přístroje. Optická zpoždění jsou do schématu vložena z důvodu obousměrné simulace a ve skutečné síti se nenacházejí.



Obrázek 5.1: Blokové schéma sítě

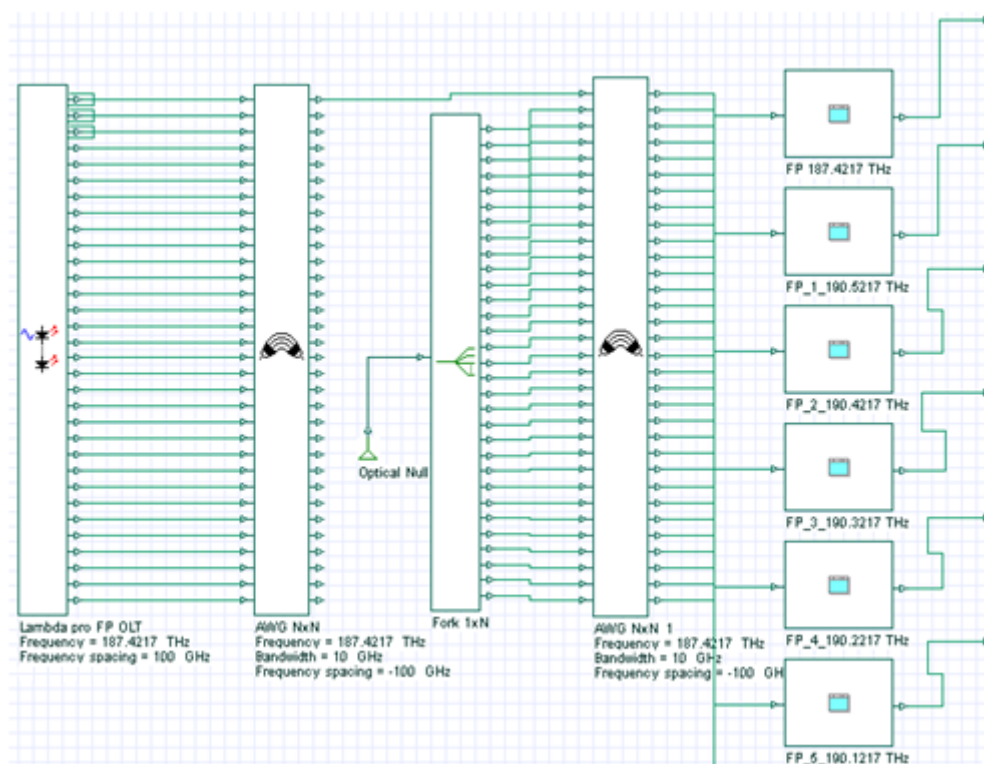
5.3 Strana OLT

Na straně OLT se nachází tyto bloky:

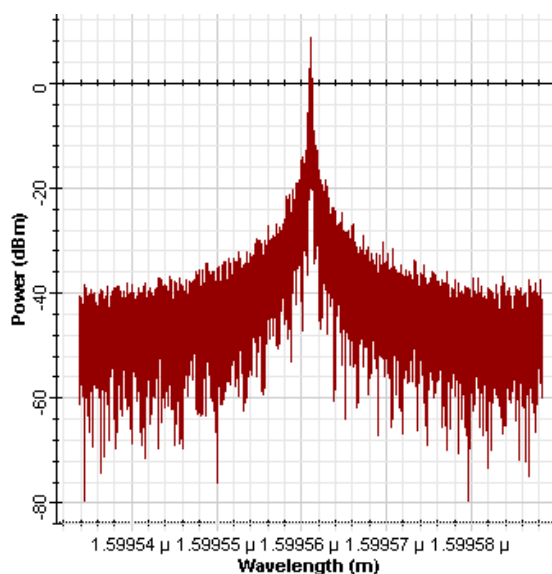
- vysílač WDM PON,
- zdroj vlnových délek pro naladění FP laserů v ONU jednotkách,
- přijímač WDM PON,
- přijímač GEPON (1310 nm),
- vysílač GEPON (1490 nm).

5.3.1 Vysílač OLT WDM PON

Vysílač WDM PON umístěný v OLT se skládá z pole laserů, dvou AWG filtrů a 32 vysílacích jednotek s Fabry-Perotovými lasery, jak je vidět na obrázku 5.2. Pole laserů vysílá v L pásmu s rozestupy mezi nosnými 100 GHz. Protože jednotlivé lasery mají široká spektra (obrázek 5.3), bylo pomocí dvou AWG filtrů dosaženo toho, že spektrum každé nosné bylo zúženo na zhruba 1 nm. Následně je všech 32 nosných přivedeno do příslušných vysílacích jednotek a poté pomocí AWG spojeno do jednoho optického svazku (obrázek 5.1).



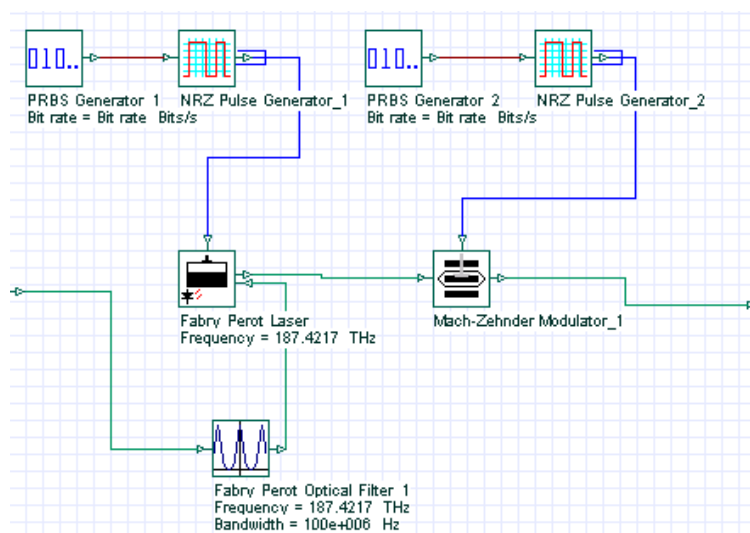
Obrázek 5.2: Schéma vysílače WDM PON v OLT



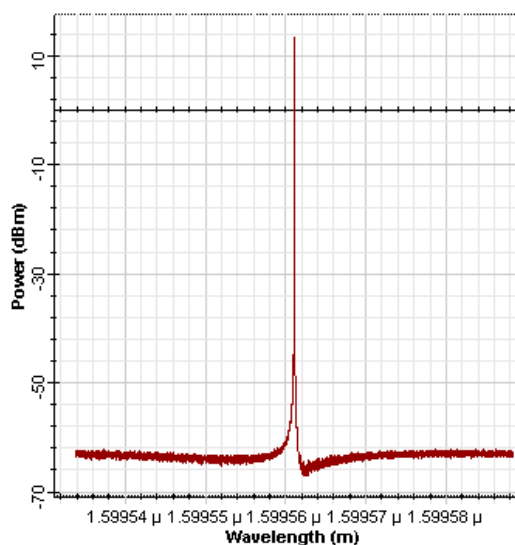
Obrázek 5.3: Spektrum 1 kanálu z pole laserů

5.3.2 Vysílací jednotka FP

Každá vysílací jednotka obsahuje zapojení z obrázku 5.4. Vysílačem je laděný Fabry-Perotův laser. Pomocí Mach-Zehnderova modulátoru a NRZ (případně RZ) kódování je dosaženo vysílání dat ve směru k uživateli. Všechny 32 vysílacích jednotek ve vysílači je identických, pouze s tím rozdílem, že každý vysílá na vlastní vlnové délce. Na obrázku 5.5 je zobrazeno spektrum Fabry-Perotova laseru.



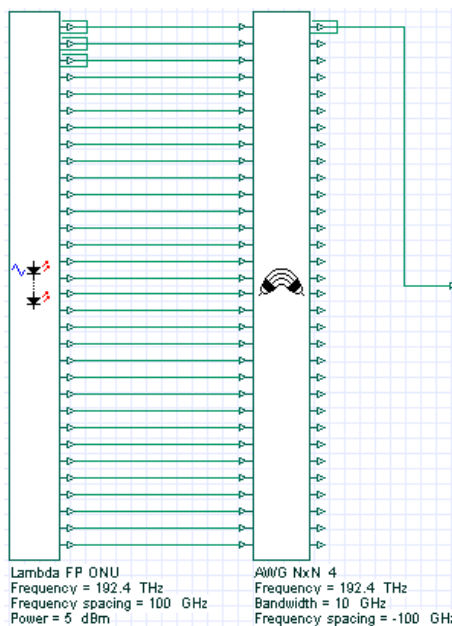
Obrázek 5.4: Schéma vysílací jednotky s Fabry-Perotovým laserem



Obrázek 5.5: Spektrum Fabry-Perotově laseru po úpravě v AGW filtru

5.3.3 Zdroj vlnových délek pro naladění ONU jednotek

Zdroj vlnových délek je umístěn v OLT a slouží pro naladění jednotlivých Fabry-Perotových laserů v ONU jednotkách (obrázek 5.6). Skládá se z pole 32 laserů, kde první laser vysílá na frekvenci 192,4 THz (C pásmo). Rozestup mezi jednotlivými lasery je 100 GHz. Pomocí AWG je všech 32 vlnových délek spojeno do jednoho svazku a poté vysíláno do multiplexoru a optického vlákna. Po přenesení k ONU jednotkám je signál opět pomocí AWG filtru rozdělen na 32 jednotlivých vlnových délek a každá vlnová délka je přivedena do Fabry-Perotova laseru, podle níž se laser naladí.



Obrázek 5.6: Schéma zdroje vlnových délek pro Fabry-Perotovy lasery v ONU jednotce

5.3.4 Vysílač GEPON 1490 nm

Schéma zapojení je obdobné jako u vysílače v ONU jednotce a je popsáno níže. Rozdílem je hodnota nastavené vlnové délky.

5.3.5 Přijímač WDM PON

Schéma zapojení přijímače WDM PON je stejné jako v ONU jednotce, pouze s tím rozdílem, že přijímá vlnové délky z C pásma.

5.3.6 Přijímač GEPON 1310 nm

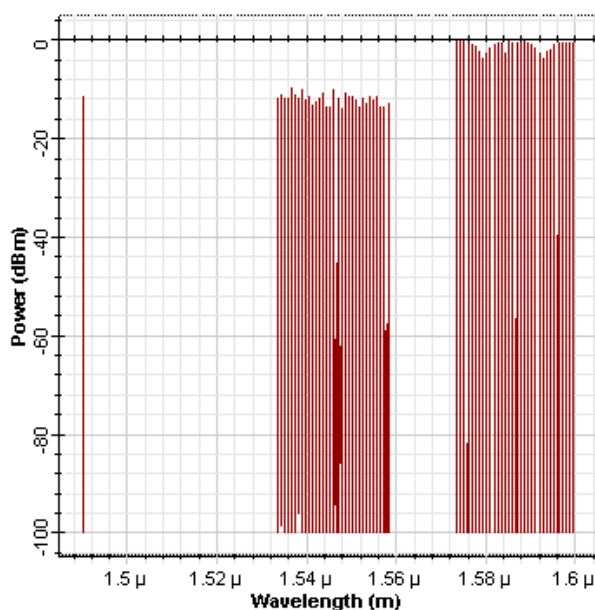
Schéma přijímače GEPON je obdobné jako u ONU jednotky a je popsáno níže.

5.4 Optické vlákno a multiplexory

Tato podkapitola se zaměřuje na činnost multiplexorů a demultiplexorů v trase, které zajišťují zpracování přenášených vlnových délek.

5.4.1 Spektrum za multiplexorem pro směr sestupný

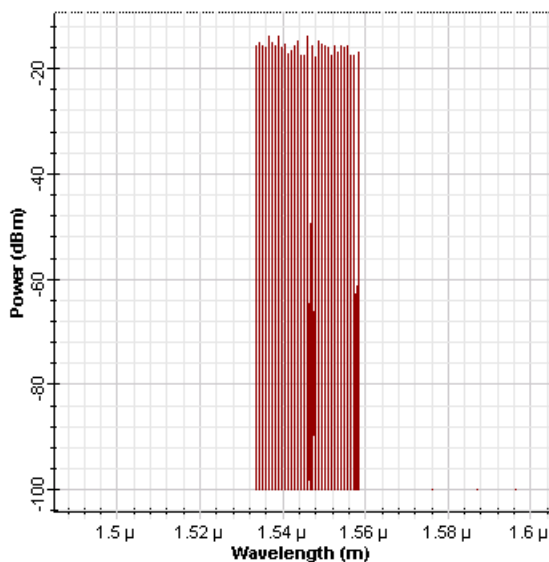
Jak je vidět z obrázku 5.7, multiplexor zpracoval všechny vstupní vlnové délky tak, aby je bylo možno přenášet společně po jednom vlákně. Z obrázku je patrné, že mezi jednotlivými vlnovými délkami nedochází ke vzájemnému rušení ani k jejich deformaci. Je zobrazena vlnová délka pro GEPON na 1490 nm, dále 32 vlnových délek v L pásmu pro směr přenosu dat k uživateli a 32 vlnových délek z C pásma, které slouží k naladění ONU jednotek.



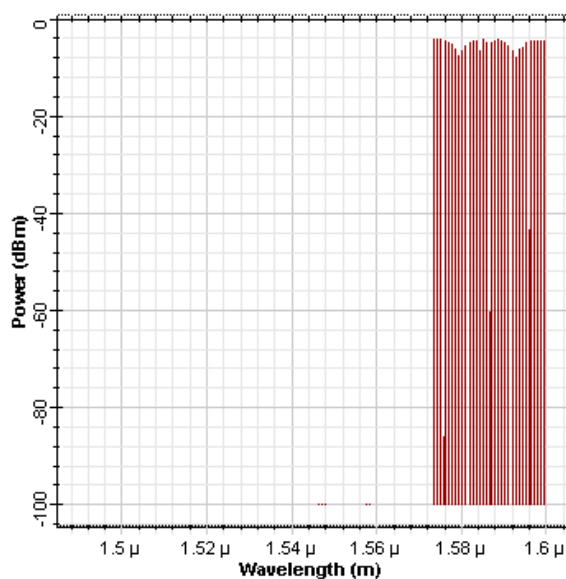
Obrázek 5.7: Spektrum vlnových délek za multiplexorem, směr sestupný

5.4.2 Spektrum za demultiplexorem pro směr sestupný

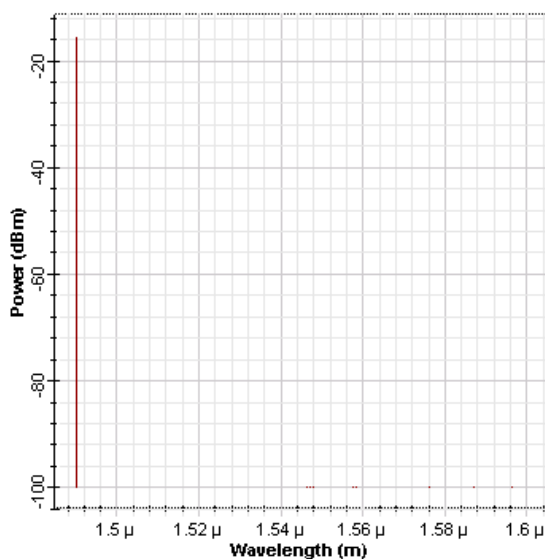
Po průchodu vláknem jsou pomocí demultiplexoru jednotlivé vlnové délky od sebe odděleny a odeslány do příslušných bloků, jak je vidět na obrázcích 5.8, 5.9 a 5.10.



Obrázek 5.8: Spektrum C pásma za demultiplexorem, směr sestupný



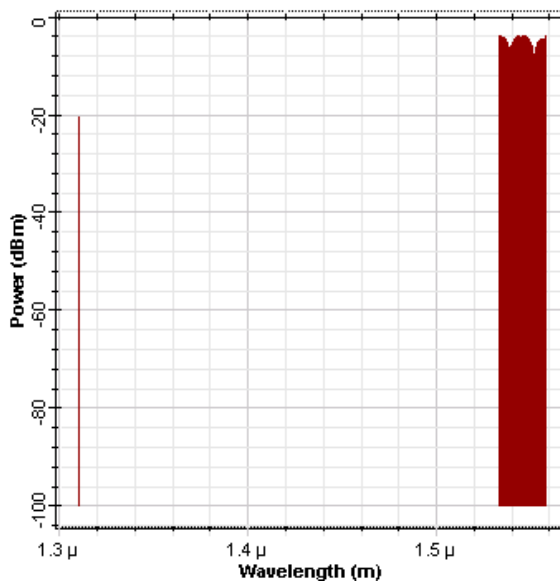
Obrázek 5.9: Spektrum L pásma za demultiplexorem, směr sestupný



Obrázek 5.10: Spektrum GEPON za demultiplexorem, směr sestupný

5.4.3 Spektra za multiplexorem pro směr vzestupný

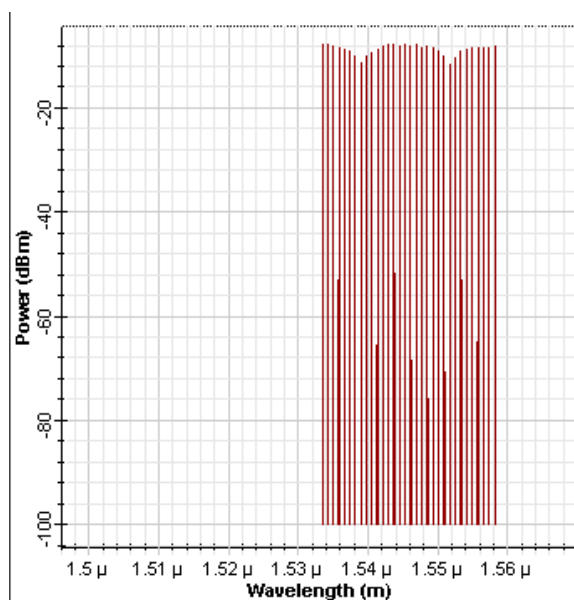
Obdobně jako v předchozím případě i tento multiplexor sloučí vstupující vlnové délky tak, aby je bylo možno přenést po jednom vlákně. V tomto směru, tedy od uživatele k poskytovateli, zpracuje vlnovou délku 1310 nm pro GEPON síť a 32 vlnových délek z C pásma, které přenášejí data. Výsledné spektrum je vidět na obrázku 5.11.



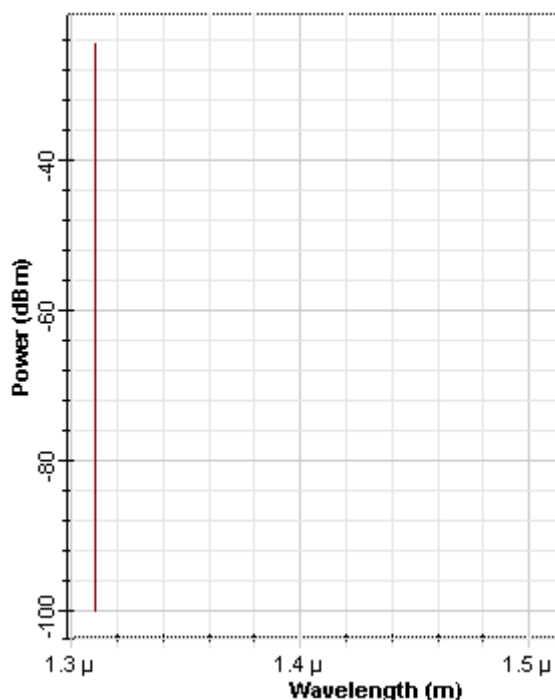
Obrázek 5.11: Spektrum vlnových délek za multiplexorem, směr vzestupný

5.4.4 Spektra za demultiplexorem pro směr vzestupný

Demultiplexor umístěný ve směru přenosu od uživatele k poskytovateli opět jednotlivé vlnové délky oddělí podle potřeby a poté jsou tyto separované vlnové délky odeslány do příslušných bloků zapojení. Jednotlivá oddělená spektra jsou vidět na obrázcích 5.12 a 5.13.



Obrázek 5.12: Spektrum za demultiplexorem C pásma, směr vzestupný



Obrázek 5.13: Spektrum za demultiplexorem pro GEAPON, směr vzestupný

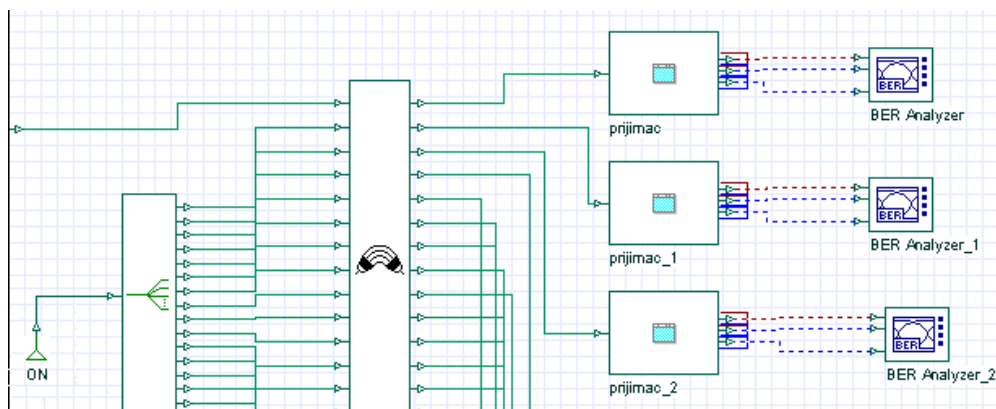
5.5 Strana ONU

Na straně ONU jednotek se nachází tyto bloky:

- přijímač WDM PON,
- vysílač WDM PON,
- přijímač GEPON (1490 nm),
- vysílač GEPON (1310 nm).

5.5.1 Přijímač WDM PON

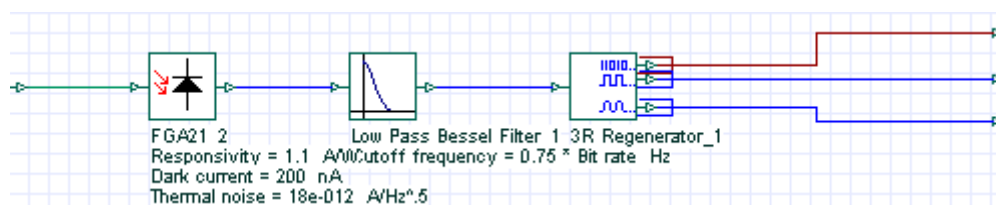
Na obrázku 5.14 se nachází přijímač WDM PON sítě, přijímající vlnové délky z L pásma. Skládá z AWG filtru, který rozdělí přicházející optický signál na 32 vlnových délek. Každá vlnová délka je poté přivedena na vlastní přijímací jednotku. Chybovost a diagram oka je možno zjistit z připojeného BER analyzátoru.



Obrázek 5.14: Schéma přijímače WDM PON sítě

5.5.2 Přijímací jednotka

Každý přijímač z obrázku 5.14 obsahuje součástky, jejichž zapojení lze vidět na obrázku 5.15. Přijímací jednotka obsahuje fotodetektor PIN FGA21, dolní filtr a 3R regenerátor, který slouží pro obnovu signálu. Dále se signál šíří na BER analyzátor.



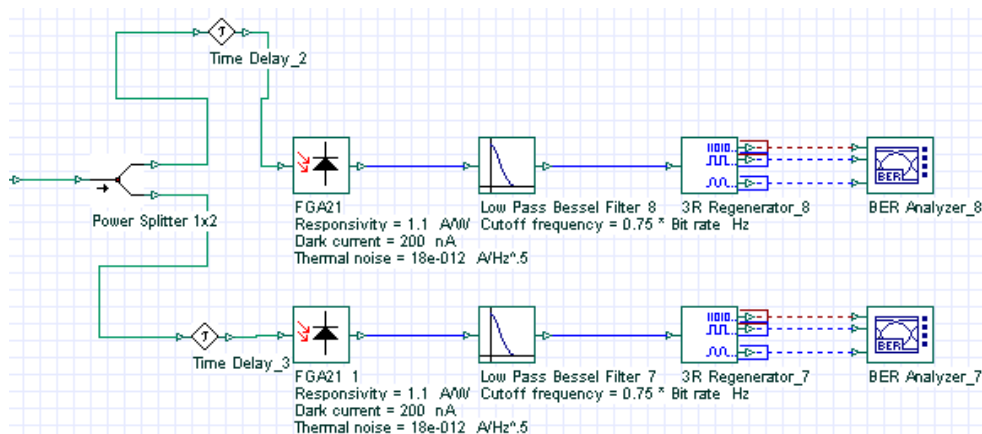
Obrázek 5.15: Schéma přijímací jednotky WDM PON v ONU

5.5.3 Vysílač WDM PON

Vysílač WDM PON na straně ONU jednotky je totožný s vysílačem na straně OLT. Jediný rozdíl je ten, že vlnové délky pro naladění Fabry-Perotových laserů přicházejí z OLT.

5.5.4 Přijímač GEAPON

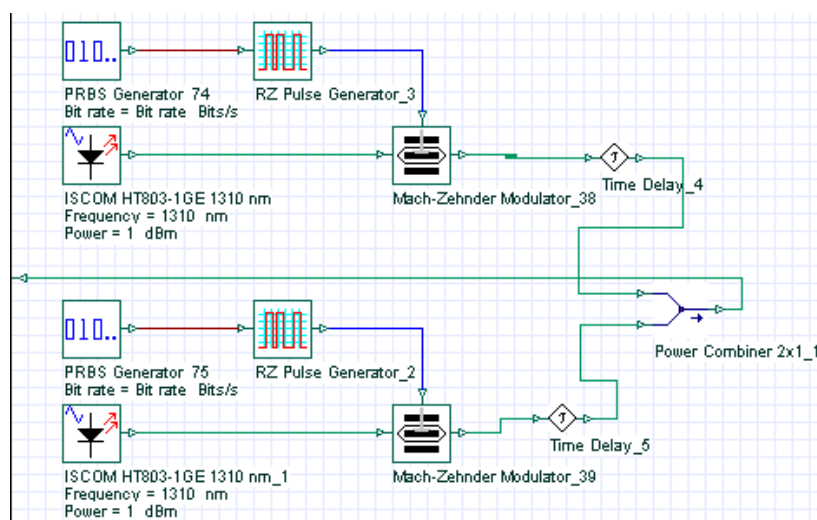
Zapojení přijímače GEAPON na straně ONU jednotek je zobrazeno na obrázku 5.16. Jedná se o přijímač pro dva kanály. Je použit fotodetektor PIN FGA21. Jeho nastavení proběhlo podle katalogového listu.



Obrázek 5.16: Schéma zapojení přijímače GEAPON

5.5.5 Vysílač GEAPON

Na obrázku 5.17 je schéma vysílače pro 2 ONU jednotky. Každý vysílač obsahuje laser o vlnové délce 1310 nm a blok pro RZ kódování. Pomocí Mach-Zehnderova modulátoru jsou data vysílána směrem k poskytovateli služeb.



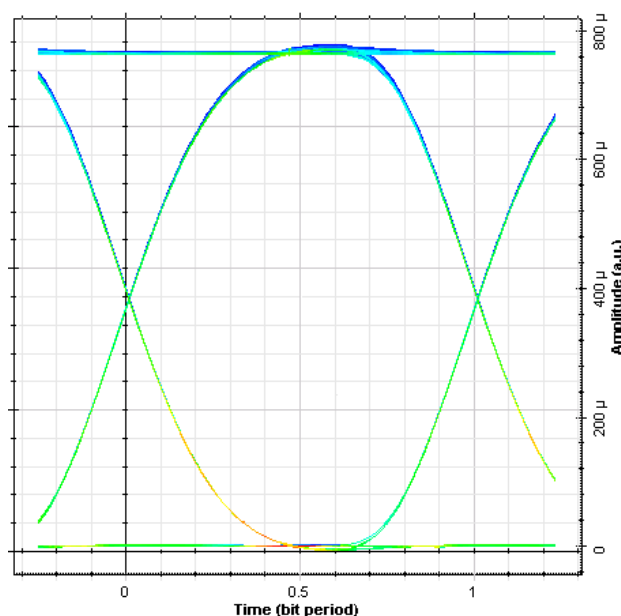
Obrázek 5.17: Schéma vysílače GEAPON v ONU jednotce 1310 nm

6 Výsledky simulace a vyhodnocení zapojené topologie

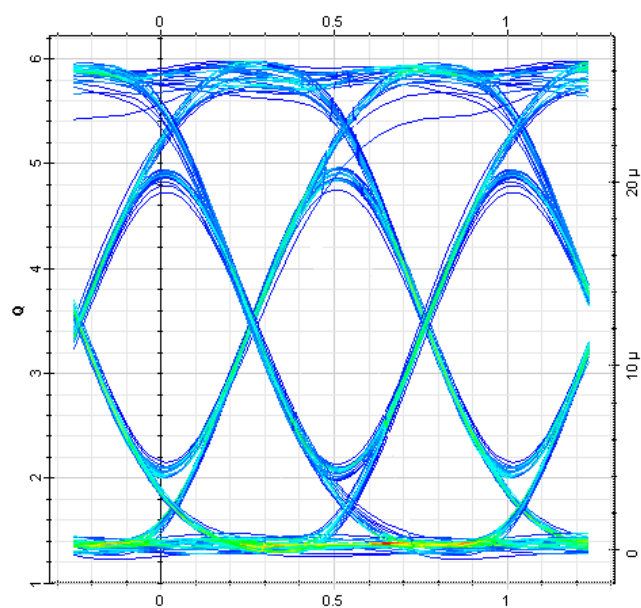
Tato kapitola se zabývá naměřenými výsledky vytvořené sítě a vyhodnocením naměřených výsledků. Jsou zde uvedeny hodnoty pro zapojení WDM PON sítě s NRZ a RZ kódováním a sítě GEAPON. V ukázkových tabulkách jsou vypsány hodnoty pro jednotlivé testované délky vlákna spolu s vysílacími a přijímanými výkony a chybovostí BER. Testované délky vlákna byly 5, 10, 15, 19 a 20 kilometrů. Kódování NRZ a RZ u WDM PON sítě je zde z důvodu, aby se dal porovnat vliv těchto kódování na GEAPON síť. Dále jsou zde grafy porovnávající jednotlivé přijímané výkonové úrovně signálu. Kompletní tabulky se nacházejí v příloze A.

6.1 Kódování NRZ pro WDM PON

Na obrázcích 6.1 a 6.2 jsou zobrazeny diagramy oka pro WDM PON síť s kódováním NRZ a GEAPON síť pro délku vlákna 20 km.



Obrázek 6.1: Diagram oka pro WDM PON síť, NRZ, 20 km



Obrázek 6.2: Diagram oka pro GEAPON síť, 20 km

Délka vlákna 5 km

Tabulka 6.1: Tabulka naměřených hodnot pro délku vlákna 5 km

Délka vlákna 5 km							
GEAPON sestupný směr		GEAPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 10,2 \text{ dBm}$		$P_v = 6,6 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-14,4	5,2 E-11	-16,0	8,1 E-11	-1,8	0	-10,3	0
-14,1	5,4 E-11	-16,1	6,8 E-11	-1,8	0	-10,2	0
-13,9	7,8 E-11	-16,1	3,2 E-11	-1,7	0	-10,3	0
-14,2	1,2 E-12	-16,1	1,1 E-11	-1,7	0	-10,3	0
-14,1	4,2 E-12	-15,9	4,7 E-11	-1,7	0	-10,5	0

Délka vlákna 10 km

Tabulka 6.2: Tabulka naměřených hodnot pro délku vlákna 10 km

Délka vlákna 10 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 10,2 \text{ dBm}$		$P_v = 6,6 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-15,7	2,5 E-10	-17,7	8,4 E-10	-2,7	0	-11,4	0
-15,8	6,6 E-10	-17,5	4,5 E-11	-2,8	0	-11,6	0
-15,2	9,1 E-10	-17,2	7,4 E-10	-2,5	0	-11,9	0
-14,9	6,5 E-10	-17,5	2,1 E-10	-2,5	0	-10,9	0
-15,0	8,9 E-11	-18,0	6,3 E-11	-2,8	0	-10,8	0

Délka vlákna 15 km

Tabulka 6.3: Tabulka naměřených hodnot pro délku vlákna 15 km

Délka vlákna 15 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 10,1 \text{ dBm}$		$P_v = 6,6 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-16,6	6,9 E-10	-19,4	1,6 E-10	-3,9	0	-12,4	0
-16,9	1,2 E-10	-19,3	2,9 E-10	-3,8	0	-12,9	0
-16,8	7,0 E-10	-19,4	5,7 E-10	-4,2	0	-12,4	0
-16,9	6,8 E-11	-19,4	6,1 E-10	-4,0	0	-13,2	0
-16,9	2,9 E-10	-18,7	4,2 E-10	-4,1	0	-13,5	0

Délka vlákna 19 km

Tabulka 6.4: Tabulka naměřených hodnot pro délku vlákna 19 km

Délka vlákna 19 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 10,3 \text{ dBm}$		$P_v = 6,6 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-17,8	4,6 E-10	-20,9	6,4 E-10	-4,7	0	-13,6	0
-17,9	2,7 E-10	-21,0	1,6 E-09	-4,6	0	-13,4	0
-17,8	6,3 E-10	-20,9	7,4 E-10	-4,7	0	-13,4	0
-17,9	1,1 E-10	-21,1	6,4 E-10	-4,7	0	-13,5	0
-17,7	5,0 E-10	-20,8	2,5 E-10	-4,5	0	-13,3	0

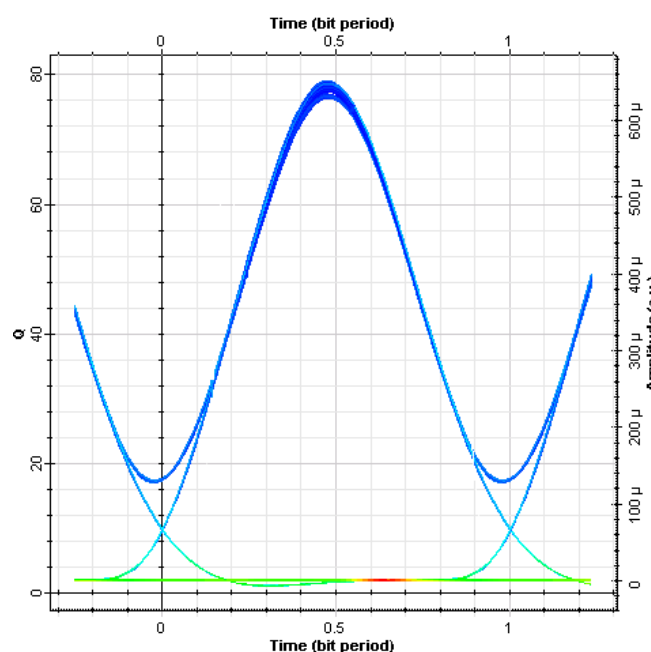
Délka vlákna 20 km

Tabulka 6.5: Tabulka naměřených hodnot pro délku vlákna 20 km

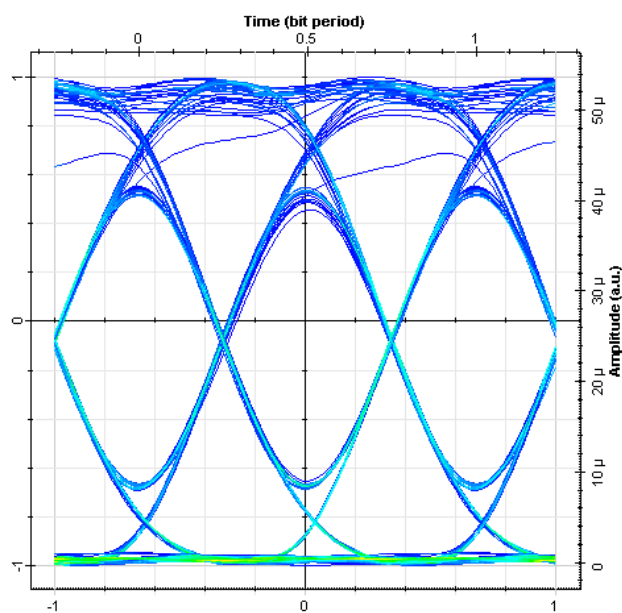
Délka vlákna 20 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2$ dBm		$P_v = 1$ dBm		$P_v = 10,3$ dBm		$P_v = 6,6$ dBm	
P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER
-19,8	1,1 E-09	-21,1	1,6 E-09	-4,6	0	-13,4	0
-19,7	4,2 E-10	-21,2	7,0 E-09	-4,6	0	-13,9	0
-19,7	6,6 E-10	-21,5	9,2 E-09	-4,7	0	-13,7	0
-20,1	6,8 E-09	-21,1	5,4 E-09	-4,8	0	-13,2	0
-19,9	1,7 E-09	-21,3	1,2 E-09	-4,7	0	-13,4	0

6.2 Kódování RZ pro WDM PON

Na obrázcích 6.3 a 6.4 jsou zobrazeny diagramy oka pro WDM PON síť s kódováním RZ a GEPON síť pro délku vlákna 20 km.



Obrázek 6.3: Diagram oka pro WDM PON síť, RZ, 20 km



Obrázek 6.4 Diagram oka pro GEAPON síť, 20 km

Délka vlákna 5 km

Tabulka 6.6: Tabulka naměřených hodnot pro délku vlákna 5 km

Délka vlákna 5 km							
GEAPON sestupný směr		GEAPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 7,3 \text{ dBm}$		$P_v = 3,6 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-14,4	3,5 E-11	-15,9	1,4 E-11	-4,6	0	-13,4	0
-14,2	8,5 E-11	-16,1	7,8 E-11	-4,8	0	-13,4	0
-14,2	3,9 E-11	-15,8	9,3 E-11	-4,5	0	-13,5	0
-14,4	4,7 E-10	-15,9	7,1 E-10	-4,3	0	-13,2	0
-14,6	6,6 E-10	-16,0	6,6 E-11	-4,4	0	-13,3	0

Délka vlákna 10 km*Tabulka 6.7: Tabulka naměřených hodnot pro délku vlákna 10 km*

Délka vlákna 10 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2$ dBm		$P_v = 1$ dBm		$P_v = 7,2$ dBm		$P_v = 3,5$ dBm	
P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER
-15,5	4,0 E-10	-17,7	8,4 E-10	-5,7	0	-14,4	0
-15,6	5,2 E-10	-17,6	2,6 E-10	-5,5	0	-14,6	0
-15,6	2,9 E-10	-18,0	3,8 E-10	-5,8	0	-14,4	0
-15,3	3,7 E-10	-17,9	8,3 E-10	-5,5	0	-14,4	0
-15,5	2,8 E-10	-17,8	4,8 E-10	-5,7	0	-14,6	0

Délka vlákna 15 km*Tabulka 6.8: Tabulka naměřených hodnot pro délku vlákna 15 km*

Délka vlákna 15 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2$ dBm		$P_v = 1$ dBm		$P_v = 7,1$ dBm		$P_v = 3,6$ dBm	
P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER
-17,0	4,2 E-10	-19,4	4,7 E-10	-6,8	0	-15,4	0
-16,8	3,8 E-10	-19,4	1,5 E-10	-6,9	0	-15,2	0
-17,1	5,2 E-10	-19,3	2,1 E-10	-6,5	0	-15,5	0
-17,2	7,3 E-11	-19,5	3,6 E-10	-7,2	0	-15,5	0
-16,8	4,0 E-10	-19,7	2,8 E-10	-7,0	0	-15,7	0

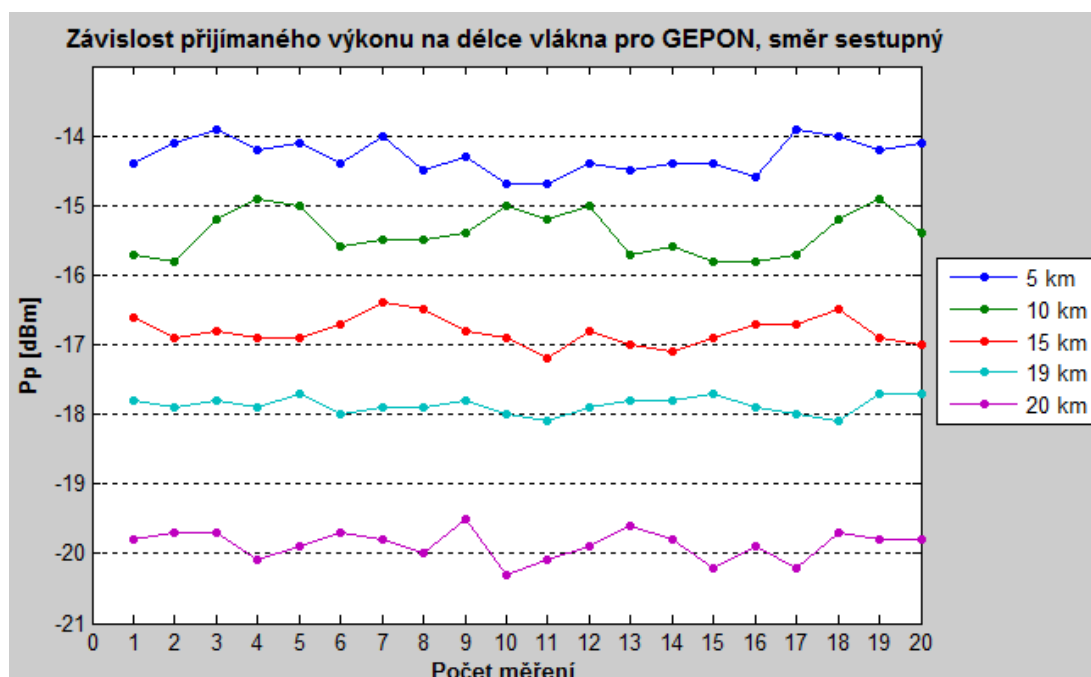
Délka vlákna 19 km*Tabulka 6.9: Tabulka naměřených hodnot pro délku vlákna 19 km*

Délka vlákna 19 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2$ dBm		$P_v = 1$ dBm		$P_v = 7,2$ dBm		$P_v = 3,3$ dBm	
P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER
-17,8	4,6 E-10	-20,8	6,4 E-10	-7,4	0	-16,5	0
-17,9	2,7 E-10	-21,0	1,6 E-09	-7,5	0	-16,8	0
-17,9	6,3 E-10	-21,2	7,4 E-10	-7,6	0	-16,6	0
-17,5	1,1 E-10	-21,1	6,4 E-10	-7,2	0	-16,6	0
-17,7	5,0 E-10	-20,8	2,5 E-10	-7,6	0	-16,6	0

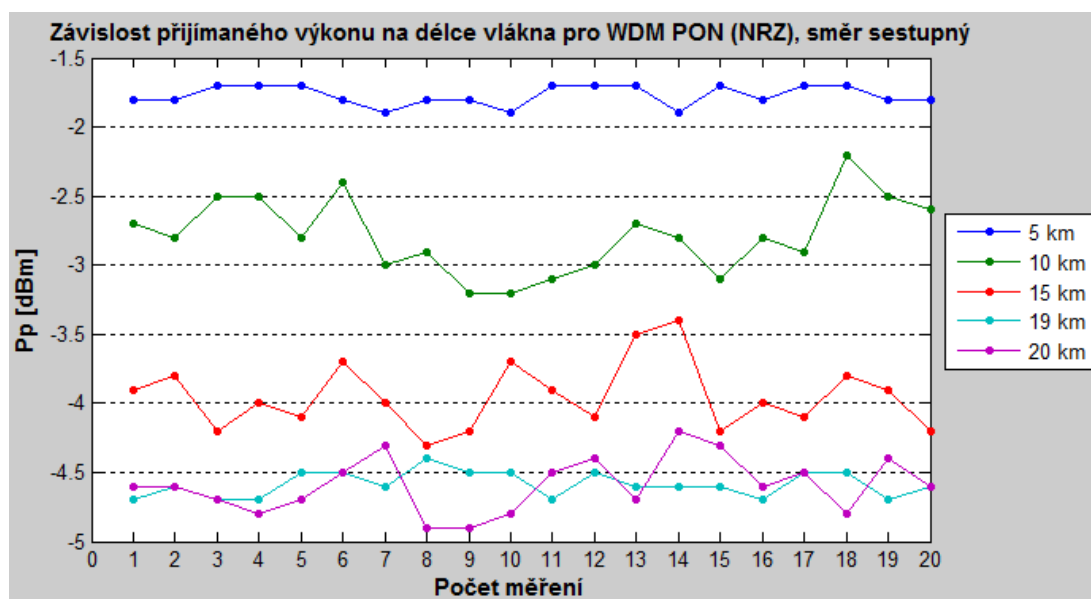
Délka vlákna 20 km*Tabulka 6.10: Tabulka naměřených hodnot pro délku vlákna 20 km*

Délka vlákna 20 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 7,2 \text{ dBm}$		$P_v = 3,2 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-18,0	1,5 E-09	-21,1	7,2 E-09	-7,7	0	-16,8	0
-18,1	1,2 E-10	-21,0	5,3 E-10	-7,8	0	-16,6	0
-17,8	6,8 E-10	-21,0	4,8 E-09	-7,7	0	-17,1	0
-17,8	6,7 E-10	-21,3	6,2 E-09	-7,6	0	-16,9	0
-18,1	3,0 E-10	-21,2	5,3 E-09	-7,4	0	-17,2	0

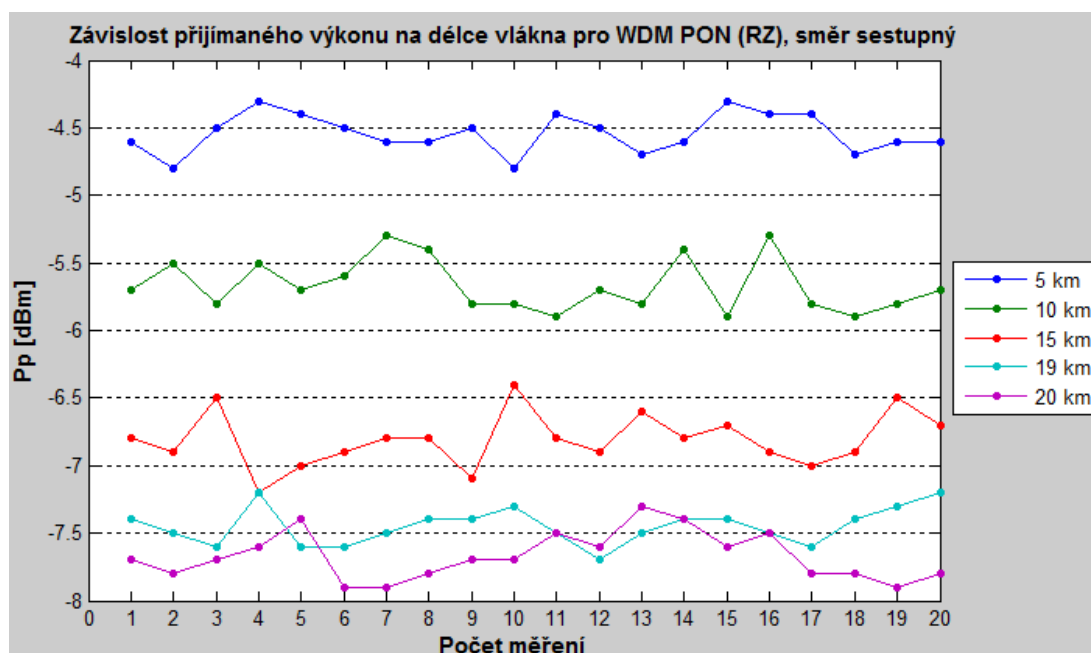
Na následujících grafech jsou zobrazeny přijímané výkonové úrovně pro jednotlivé měřené délky vlákna. Na grafu 6.1 je porovnání pro GEPON síť v sestupném směru, graf 6.2 potom zobrazuje porovnání pro WDM PON síť s NRZ kódováním rovněž v sestupném směru. Na grafu 6.3 je zobrazen grafy pro WDM PON síť v sestupném směru s RZ kódováním. Z porovnání grafů 6.2 a 6.3 jde vidět rozdíl v hodnotách přijímaných výkonů způsobený různými druhy kódování. Všechny grafy jsou vytvořeny z kompletních tabulek A.1 až A.10 nacházejících se v příloze A. Grafy pro zbývající směry přenosu a WDM PON síť s RZ kódováním jsou v příloze B (grafy B.1 až B.5).



Graf. 6.1: Grafické znázornění přijímaných výkonových úrovní signálu pro GEPON



Graf. 6.2: Graf přijímaných výkonových úrovní signálu pro WDM PON s NRZ kódováním



Graf. 6.3: Graf přijímaných výkonových úrovní signálu pro WDM PON s RZ kódováním

Z grafů 6.1 až 6.3 je vidět, že pokles přijímaných výkonových úrovní na přijímačích je úměrný délce vlákna. S rostoucí délkou vlákna tento přijímaný výkon klesá a to tak, že na každých 5 km vzdálenosti klesne přibližně o 1 dBm (přibližně 1,26 mW). Grafy byly vytvořeny z kompletních tabulek z přílohy A. Přehledové tabulky 6.11 a 6.12 ukazují, jak se mění průměrná přijímaná výkonová úroveň (P_{pr}) a chybovost BER s rostoucí délkou vlákna.

Tabulka 6.11: Přehledová tabulka průměrných hodnot, WDM PON (NRZ)

GEPON (RZ), WDM PON (NRZ)								
-	GEPON směr sestupný		GEPON směr vzestupný		WDM PON směr sestupný		WDM PON směr vzestupný	
	P_{pr} [dBm]	BER	P_{pr} [dBm]	BER	P_{pr} [dBm]	BER	P_{pr} [dBm]	BER
5 km	-14,3	4,4 E-11	-16,1	1,2 E-10	-1,8	0	-10,2	0
10 km	-15,4	3,3 E-10	-17,8	3,8 E-10	-2,8	0	-11,3	0
15 km	-16,8	4,3 E-10	-19,1	7,3 E-10	-4,0	0	-12,7	0
19 km	-17,9	8,2 E-10	-20,9	9,7 E-10	-4,6	0	-13,4	0
20 km	-19,9	1,9 E-09	-21,1	4,8 E-09	-4,6	0	-13,4	0

Tabulka 6.12: Přehledová tabulka průměrných hodnot, WDM PON (RZ)

GEPON (RZ), WDM PON (RZ)								
-	GEPON směr sestupný		GEPON směr vzestupný		WDM PON směr sestupný		WDM PON směr vzestupný	
-	P _{pr} [dBm]	BER	P _{pr} [dBm]	BER	P _{pr} [dBm]	BER	P _{pr} [dBm]	BER
5 km	-14,4	1,8 E-10	-16,0	2,4 E-10	-4,5	0	-13,4	0
10 km	-15,6	4,1 E-10	-17,7	3,4 E-10	-5,7	0	-14,5	0
15 km	-16,9	3,5 E-10	-19,4	4,0 E-10	-6,8	0	-15,5	0
19 km	-17,8	8,2 E-10	-20,9	9,7 E-10	-7,5	0	-16,6	0
20 km	-18,0	9,5 E-10	-21,1	3,0 E-09	-7,7	0	-16,8	0

6.3 Vyhodnocení naměřených dat

Pokud by byla provozována pouze WDM PON síť, bylo by možno překlenout vzdálenost přes 120 km. Stejně tak by podle simulací měla samostatná GEPON síť dosah přibližně 25 km. Ovšem v tomto případě se na stejném vlákně provozuje WDM PON i GEPON síť a proto vznikají různé limitace, neboť obě sítě se vzájemně ovlivňují.

Jak je z tabulek 6.1 až 6.10 (případně z kompletních tabulek A.1 až A.10) vidět, kombinovaná síť WDM PON a GEPON je značně limitovaná z hlediska dosažitelné vzdálenosti. Takto provozovaná síť má dosah pro kvalitní datovou komunikaci zhruba do 19 km. Limitace maximálního dosahu sítě vychází především z integrace sítě GEPON, pro kterou při vzdálenosti 20 km dosahuje chybovost BER hodnot větších než $1 \cdot 10^{-9}$, což je považováno za maximální dovolenou chybovost.

Kódování v síti WDM PON nemá vliv na maximální překlenutelnou vzdálenost integrované sítě. Kódováním RZ se snižuje dosažitelná vzdálenost na přibližně 100 km pouze v případě samostatně stojící sítě WDM PON. Je to z toho důvodu, že RZ kódování je náročnější na šířku pásma. Také je náročnější na výkon zdroje, jak je vidět z porovnání tabulek 6.1 až 6.10, kdy dochází k poklesu vysílací výkonové úrovně z přibližně 10 dBm na přibližně 7 dBm pro sestupný směr a z 6,6 dBm na přibližně 3,4 dBm pro vzestupný směr. Ovšem v kombinaci obou sítí pracujících společně po jednom vlákně tato kódování nemají na dosah sítě vliv, protože limitace vychází ze sítě GEPON. Stejně tak nemá druh kódování WDM PON sítě vliv na GEPON síť.

Řešením toho, jak vylepšit dosah, případně snížit chybovost BER, v takto kombinované síti, by bylo zvýšit výkon vysílačů v GEPON síti, pokud by to dané zařízení umožňovalo. Jelikož je ale dosah sítě GEPON limitován byl by přínos minimální (pouze v jednotkách kilometrů). Jako další možnost zvýšení dosahu se jeví snížení přenosové rychlosti, což je ovšem nežádoucí jev pro zákazníky, protože požadavky zákazníků směřují na neustálé zvyšování přenosových rychlostí.

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo teoreticky popsat síť typu WDM PON a GEPON a dále pak odpovědět na otázku, zda by bylo možné vytvořit a provozovat integrovanou pasivní optickou síť, která umožňuje společný provoz WDM PON a GEPON sítě po jednom optickém vlákně. Problém vytvoření sítě byl řešen ve vývojovém prostředí Optiwave Optisystem 11, který je zaměřen na simulace optických sítí. Dále bylo potřebné zjistit dosah takto vytvořené sítě.

V teoretické části práce byly popsány základní informace o WDM PON a GEPON sítích a shrnuty principy jejich funkce. U WDM PON sítí se práce zaměřuje na popis používaných vlnových pásem a různé druhy přenosu. Také se zaměřuje na některé důležité prvky optických sítí, jako jsou například zdroje optického záření a fotodetektory, které se v praxi nejčastěji používají a dále na způsoby umístění podle zakončení vlákna a popis základních topologií optických sítí obecně.

V praktické části práce bylo vytvořeno ve vývojovém prostředí Optiwave Optisystem 11 schéma zapojení integrované WDM PON a GEPON sítě s cílem zjistit, zda takto vytvořená síť bude fungovat a jaký bude její maximální překlenutelný dosah pro kvalitní komunikaci. Pro takto vytvořenou síť byla provedena série měření. Z hlediska optických spekter jednotlivých sítí nedocházelo k problémům a použité multiplexory a demultiplexory byly schopny jednotlivá spektra zpracovat tak, že mezi nimi nedocházelo ke vzájemnému rušení. Dále bylo z měření zjištěno, že dosah takto vytvořené sítě je přibližně 19 kilometrů. Při délce optického vlákna 20 kilometrů již docházelo k tomu, že chybovost BER překračovala maximální dovolenou mez a komunikace by už v tomto případě mohla být nekvalitní. Hlavní limitací této integrované sítě byla síť GEPON, která měla zásadní vliv na maximální dosah sítě, protože WDM PON síť umožňovala dosah přes 100 kilometrů. Řešením problému jak zvýšit dosah sítě, by bylo buď zvýšení výkonu GEPON sítě, případně snížení přenosové rychlosti.

Tato práce slouží jako přehled základních informací o optických sítích a otevírá možnost spojení dvou druhů pasivních sítí tak, aby mohly být provozovány současně po jednom optickém vlákně. Tato vlastnost by umožnila zvýšit přenosovou kapacitu již vytvořených tras bez nutnosti výkopových prací a pokládek dalších kabelů. Část práce by mohla také sloužit jako pomůcka při vytváření této integrované sítě přímo v laboratoři, což by mohlo být náplní bakalářské či diplomové práce jiných studentů.

Použitá literatura

- [1] Pasivní optické přístupové sítě - PON. [online]. [cit. 2012-11-30]. Dostupné z: www.comtel.cz/files/download.php?id=4149
- [2] VODRÁŽKA, J. Základy FTTx. [online]. 2006 [cit. 2012-11-30]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=zaklady-fttx&cislocclanku=2006051702>
- [3] G.983.1. *Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)*. 2005-04-28. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.1-200501-I/en>
- [4] LAFATA, P. Pasivní optická přístupová síť EPON. [online]. 23. 05. 2009 [cit. 2012-11-30]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2009050003>
- [5] G.694.2. *Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*. 2004-02-17. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I>
- [6] LAFATA, P. Pasivní optické sítě WDM PON. [online]. 24. 05. 2009 [cit. 2012-11-30]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2009050004>
- [7] KRAUSS, Ottmar. *DWDM and Optical Networks: An Introduction in Terabit Technology*. Munich: Publicis, 2002. ISBN 3-89578-174-6.
- [8] MUKHERJEE, Biswanath. *Optical WDM networks*. New York: Springer, 2006, xliii, 953 p. ISBN 978-038-7290-553.
- [9] Optical Technologies: Noise in photodetectors. [online]. 2008 [cit. 2012-11-30]. Dostupné z: <http://optical-technologies.info/noise-in-photodetectors>
- [10] DR. PASCHOTTA, Rüdiger. Encyclopedia of Laser Physics and Technology: Photodiodes. [online]. 2011, 2011-06-09 [cit. 2012-11-30]. Dostupné z: <http://www.rp-photonics.com/photodiodes.html>
- [11] DR. PASCHOTTA, Rüdiger. Encyclopedia of Laser Physics and Technology: p-i-n Photodiodes. [online]. 2011, 2011-04-29 [cit. 2012-11-30]. Dostupné z: http://www.rp-photonics.com/p_i_n_photodiodes.html
- [12] Encyclopedia of Laser Physics and Technology: Avalanche Photodiodes. [online]. 2011, 2012-04-17 [cit. 2012-11-30]. Dostupné z: http://www.rp-photonics.com/avalanche_photodiodes.html
- [13] PRAT, Josep. *Next-generation FTTH passive optical networks*. New York: Springer, 2008, p. cm. ISBN 978-140-2084-690.
- [14] G.694.1. *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*. 2012. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-I/en>
- [15] LAM, Cedric F. *Passive optical networks: principles and practice*. Boston: Elsevier/Academic Press, c2007, xlii, 324 p. ISBN 01-237-3853-9.
- [16] KAZOVSKY, Leonid G. *Broadband optical access networks*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2011, xvi, 283 p. ISBN 978-047-0182-352.

Seznam příloh

Příloha A:	Tabulky naměřených hodnot	X
Příloha B:	Grafy	III

Součástí DP je DVD.

Adresářová struktura přiloženého DVD:

- Integrace xPON sítě do jedné sítě.pdf
- Integrace xPON sítě do jedné sítě - schéma.osd

Příloha A: Tabulky naměřených hodnot

Pozn: P_v ... Vysílaná výkonová úroveň P_p ...Přijímaná výkonová úroveň

Tabulka A.1: Tabulka hodnot pro kódování NRZ (WDM PON), délka vlákna 5 km

Délka vlákna 5 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2$ dBm		$P_v = 1$ dBm		$P_v = 10,2$ dBm		$P_v = 6,6$ dBm	
P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER	P_p [dBm]	BER
-14,4	5,2 E-11	-16,0	8,1 E-11	-1,8	0	-10,3	0
-14,1	5,4 E-11	-16,1	6,8 E-11	-1,8	0	-10,2	0
-13,9	7,8 E-11	-16,1	3,2 E-11	-1,7	0	-10,3	0
-14,2	1,2 E-12	-16,1	1,1 E-11	-1,7	0	-10,3	0
-14,1	4,2 E-12	-15,9	4,7 E-11	-1,7	0	-10,5	0
-14,4	5,0 E-11	-16,3	6,9 E-10	-1,8	0	-10,4	0
-14,0	8,1 E-11	-15,9	3,6 E-11	-1,9	0	-10,2	0
-14,5	3,3 E-12	-16,0	5,2 E-11	-1,8	0	-10,2	0
-14,3	6,3 E-11	-16,1	4,0 E-11	-1,8	0	-10,3	0
-14,7	2,2 E-11	-16,1	3,6 E-10	-1,9	0	-10,1	0
-14,7	4,1 E-11	-16,0	4,7 E-10	-1,7	0	-10,1	0
-14,4	7,0 E-11	-16,0	3,3 E-11	-1,7	0	-10,2	0
-14,5	8,9 E-11	-16,1	7,7 E-11	-1,7	0	-10,4	0
-14,4	5,1 E-11	-16,1	8,3 E-11	-1,9	0	-10,2	0
-14,4	5,5 E-11	-15,9	5,7 E-11	-1,7	0	-10,3	0
-14,6	6,4 E-11	-16,2	5,9 E-11	-1,8	0	-10,1	0
-13,9	3,6 E-12	-16,1	8,3 E-11	-1,7	0	-10,1	0
-14,0	4,2 E-12	-16,0	7,1 E-11	-1,7	0	-10,0	0
-14,2	4,1 E-11	-16,1	5,9 E-11	-1,8	0	-10,2	0
-14,1	4,7 E-11	-16,1	6,0 E-11	-1,8	0	-10,1	0
Průměrné hodnoty							
-14,3	4,4 E-11	-16,1	1,2 E-10	-1,8	0	-10,2	0

Tabulka A.2: Tabulka hodnot pro kódování NRZ (WDM PON), délka vlákna 10 km

Délka vlákna 10 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 10,2 \text{ dBm}$		$P_v = 6,6 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-15,7	2,5 E-10	-17,7	8,4 E-10	-2,7	0	-11,4	0
-15,8	6,6 E-10	-17,5	4,5 E-11	-2,8	0	-11,6	0
-15,2	9,1 E-10	-17,2	7,4 E-10	-2,5	0	-11,9	0
-14,9	6,5 E-10	-17,5	2,1 E-10	-2,5	0	-10,9	0
-15,0	8,9 E-11	-18,0	6,3 E-11	-2,8	0	-10,8	0
-15,6	4,7 E-11	-18,1	8,0 E-10	-2,4	0	-11,6	0
-15,5	3,8 E-11	-17,9	1,4 E-10	-3,0	0	-11,4	0
-15,5	6,4 E-10	-17,8	6,5 E-10	-2,9	0	-11,4	0
-15,4	2,7 E-11	-18,1	8,3 E-11	-3,2	0	-11,8	0
-15,0	7,1 E-10	-17,4	7,2 E-11	-3,2	0	-11,2	0
-15,2	4,1 E-10	-17,9	3,1 E-11	-3,1	0	-11,6	0
-15,0	3,8 E-10	-17,7	5,5 E-10	-3,0	0	-11,3	0
-15,7	2,0 E-11	-17,8	9,4 E-10	-2,7	0	-11,2	0
-15,6	7,5 E-10	-17,7	2,0 E-10	-2,8	0	-11,5	0
-15,8	9,5 E-11	-17,6	3,5 E-10	-3,1	0	-10,9	0
-15,8	3,1 E-11	-18,0	1,8 E-10	-2,8	0	-11,0	0
-15,7	2,5 E-11	-18,1	6,6 E-10	-2,9	0	-11,6	0
-15,2	2,1 E-11	-17,9	4,8 E-11	-2,2	0	-11,4	0
-14,9	4,7 E-11	-17,7	2,1 E-10	-2,5	0	-11,3	0
-15,4	8,3 E-10	-17,8	6,9 E-10	-2,6	0	-11,1	0
Průměrné hodnoty							
-15,4	3,3 E-10	-17,8	3,8 E-10	-2,8	0	-11,3	0

Tabulka A.3: Tabulka hodnot pro kódování NRZ (WDM PON), délka vlákna 15 km

Délka vlákna 15 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 10,1 \text{ dBm}$		$P_v = 6,6 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-16,6	6,9 E-10	-19,4	1,6 E-10	-3,9	0	-12,4	0
-16,9	1,2 E-10	-19,3	2,9 E-10	-3,8	0	-12,9	0
-16,8	7,0 E-10	-19,4	5,7 E-10	-4,2	0	-12,4	0
-16,9	6,8 E-11	-19,4	6,1 E-10	-4,0	0	-13,2	0
-16,9	2,9 E-10	-18,7	4,2 E-10	-4,1	0	-13,5	0
-16,7	3,6 E-10	-18,5	6,9 E-10	-3,7	0	-13,1	0
-16,4	9,1 E-10	-19,0	4,4 E-09	-4,0	0	-12,8	0
-16,5	4,7 E-11	-19,1	6,0 E-10	-4,3	0	-12,4	0
-16,8	6,3 E-11	-19,2	1,3 E-09	-4,2	0	-12,6	0
-16,9	6,2 E-11	-18,7	6,9 E-10	-3,7	0	-12,3	0
-17,2	2,7 E-10	-18,8	9,2 E-10	-3,9	0	-13,0	0
-16,8	4,6 E-10	-18,9	3,8 E-10	-4,1	0	-13,1	0
-17,0	5,8 E-10	-19,2	1,2 E-09	-3,5	0	-12,4	0
-17,1	7,9 E-10	-19,2	4,9 E-10	-3,4	0	-12,5	0
-16,9	4,1 E-10	-19,4	3,9 E-10	-4,2	0	-12,5	0
-16,7	3,0 E-11	-19,3	2,8 E-10	-4,0	0	-12,3	0
-16,7	8,8 E-10	-19,0	1,7 E-10	-4,1	0	-13,0	0
-16,5	6,9 E-10	-19,2	5,5 E-10	-3,8	0	-12,8	0
-16,9	4,2 E-10	-19,4	1,9 E-10	-3,9	0	-12,4	0
-17,0	7,1 E-10	-19,3	3,8 E-10	-4,2	0	-12,2	0
Průměrné hodnoty							
-16,8	4,3 E-10	-19,1	7,3 E-10	-4,0	0	-12,7	0

Tabulka A.4: Tabulka hodnot pro kódování NRZ (WDM PON), délka vlákna 19 km

19 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 10,3 \text{ dBm}$		$P_v = 6,6 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-17,8	4,6 E-10	-20,9	6,4 E-10	-4,7	0	-13,6	0
-17,9	2,7 E-10	-21,0	1,6 E-09	-4,6	0	-13,4	0
-17,8	6,3 E-10	-20,9	7,4 E-10	-4,7	0	-13,4	0
-17,9	1,1 E-10	-21,1	6,4 E-10	-4,7	0	-13,5	0
-17,7	5,0 E-10	-20,8	2,5 E-10	-4,5	0	-13,3	0
-18,0	2,5 E-10	-20,7	3,7 E-10	-4,5	0	-13,5	0
-17,9	3,4 E-10	-20,8	4,5 E-10	-4,6	0	-13,2	0
-17,9	7,8 E-10	-20,7	6,6 E-10	-4,4	0	-13,5	0
-17,8	4,5 E-10	-20,7	1,3 E-10	-4,5	0	-13,4	0
-18,0	6,8 E-10	-20,8	3,5 E-10	-4,5	0	-13,7	0
-18,1	4,4 E-10	-20,7	6,8 E-10	-4,7	0	-13,5	0
-17,9	4,0 E-10	-20,9	4,5 E-10	-4,5	0	-13,2	0
-17,8	7,8 E-09	-21,0	8,5 E-10	-4,6	0	-13,6	0
-17,8	4,1 E-10	-20,9	1,2 E-10	-4,6	0	-13,2	0
-17,7	2,1 E-10	-20,8	3,0 E-09	-4,6	0	-13,6	0
-17,9	3,0 E-10	-20,8	8,5 E-10	-4,7	0	-13,4	0
-18,0	5,7 E-10	-20,9	6,6 E-09	-4,5	0	-13,4	0
-18,1	4,4 E-10	-21,0	5,8 E-10	-4,5	0	-13,5	0
-17,7	6,1 E-10	-20,7	1,7 E-10	-4,7	0	-13,4	0
-17,7	7,3 E-10	-20,9	4,2 E-10	-4,6	0	-13,6	0
Průměrné hodnoty							
-17,9	8,2 E-10	-20,9	9,7 E-10	-4,6	0	-13,4	0

Tabulka A.5: Tabulka hodnot pro kódování NRZ (WDM PON), délka vlákna 20 km

Délka vlákna 20 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 10,3 \text{ dBm}$		$P_v = 6,6 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-19,8	1,1 E-09	-21,1	1,6 E-09	-4,6	0	-13,4	0
-19,7	4,2 E-10	-21,2	7,0 E-09	-4,6	0	-13,9	0
-19,7	6,6 E-10	-21,5	9,2 E-09	-4,7	0	-13,7	0
-20,1	6,8 E-09	-21,1	5,4 E-09	-4,8	0	-13,2	0
-19,9	1,7 E-09	-21,3	1,2 E-09	-4,7	0	-13,4	0
-19,7	7,5 E-09	-20,8	2,9 E-09	-4,5	0	-13,6	0
-19,8	3,2 E-10	-20,8	9,4 E-09	-4,3	0	-13,3	0
-20,0	7,1 E-09	-21,0	6,2 E-09	-4,9	0	-12,9	0
-19,5	3,0 E-10	-21,2	3,0 E-09	-4,9	0	-13,0	0
-20,3	2,6 E-10	-21,2	3,9 E-09	-4,8	0	-13,4	0
-20,1	4,8 E-10	-20,7	2,4 E-09	-4,5	0	-13,3	0
-19,9	2,1 E-09	-21,3	6,7 E-09	-4,4	0	-13,6	0
-19,6	7,8 E-10	-21,2	3,3 E-09	-4,7	0	-13,4	0
-19,8	5,0 E-10	-21,0	7,2 E-09	-4,2	0	-13,5	0
-20,2	6,9 E-10	-20,8	1,6 E-09	-4,3	0	-13,3	0
-19,9	3,7 E-10	-20,9	5,9 E-09	-4,6	0	-12,9	0
-20,2	4,0 E-09	-20,7	6,90E-09	-4,5	0	-13,4	0
-19,7	1,1 E-09	-21,3	3,6 E-09	-4,8	0	-13,7	0
-19,8	1,9 E-09	-21,1	2,2 E-09	-4,4	0	-13,2	0
-19,8	4,2 E-10	-21,2	7,1 E-09	-4,6	0	-13,6	0
Průměrné hodnoty							
-19,9	1,9 E-09	-21,1	4,8 E-09	-4,6	0	-13,4	0

Tabulka A.6: Tabulka hodnot pro kódování RZ (WDM PON), délka vlákna 5 km

Délka vlákna 5 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 7,3 \text{ dBm}$		$P_v = 3,6 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-14,4	3,5 E-11	-15,9	1,4 E-11	-4,6	0	-13,4	0
-14,2	8,5 E-11	-16,1	7,8 E-11	-4,8	0	-13,4	0
-14,2	3,9 E-11	-15,8	9,3 E-11	-4,5	0	-13,5	0
-14,4	4,7 E-10	-15,9	7,1 E-10	-4,3	0	-13,2	0
-14,6	6,6 E-10	-16,0	6,6 E-11	-4,4	0	-13,3	0
-14,2	5,0 E-11	-16,1	3,9 E-10	-4,5	0	-13,3	0
-14,4	7,5 E-11	-16,0	4,8 E-10	-4,6	0	-13,4	0
-14,5	2,1 E-11	-16,2	7,0 E-10	-4,6	0	-13,6	0
-14,3	8,0 E-11	-15,7	7,1 E-10	-4,5	0	-13,3	0
-14,3	9,2 E-11	-15,6	9,0 E-11	-4,8	0	-13,3	0
-14,2	4,7 E-10	-15,7	2,5 E-11	-4,4	0	-13,4	0
-14,3	3,5 E-11	-15,9	1,5 E-11	-4,5	0	-13,5	0
-14,3	8,8 E-10	-16,0	4,3 E-11	-4,7	0	-13,6	0
-14,4	2,4 E-11	-16,2	1,2 E-11	-4,6	0	-13,6	0
-14,4	3,3 E-11	-15,8	6,8 E-10	-4,3	0	-13,1	0
-14,1	3,5 E-11	-16,1	4,5 E-10	-4,4	0	-13,7	0
-14,6	4,8 E-10	-16,0	4,0 E-11	-4,4	0	-13,1	0
-14,5	1,9 E-11	-16,1	6,8 E-11	-4,7	0	-13,6	0
-14,6	3,2 E-11	-15,7	3,5 E-11	-4,6	0	-13,4	0
-14,4	4,0 E-11	-16,2	7,1 E-11	-4,6	0	-13,5	0
Průměrné hodnoty							
-14,4	1,8 E-10	-16,0	2,4 E-10	-4,5	0	-13,4	0

Tabulka A.7: Tabulka hodnot pro kódování RZ (WDM PON), délka vlákna 10 km

Délka vlákna 10 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 7,2 \text{ dBm}$		$P_v = 3,5 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-15,5	4,0 E-10	-17,7	8,4 E-10	-5,7	0	-14,4	0
-15,6	5,2 E-10	-17,6	2,6 E-10	-5,5	0	-14,6	0
-15,6	2,9 E-10	-18,0	3,8 E-10	-5,8	0	-14,4	0
-15,3	3,7 E-10	-17,9	8,3 E-10	-5,5	0	-14,4	0
-15,5	2,8 E-10	-17,8	4,8 E-10	-5,7	0	-14,6	0
-15,7	4,2 E-10	-17,9	7,1 E-11	-5,6	0	-14,9	0
-15,6	8,2 E-11	-18,0	7,5 E-10	-5,3	0	-14,7	0
-15,3	4,4 E-10	-17,7	6,8 E-10	-5,4	0	-14,5	0
-15,8	3,0 E-11	-17,8	6,9 E-10	-5,8	0	-14,3	0
-15,7	4,7 E-11	-17,9	2,2 E-10	-5,8	0	-14,8	0
-15,9	6,9 E-10	-17,7	3,0 E-11	-5,9	0	-14,2	0
-15,4	9,1 E-10	-17,6	5,7 E-11	-5,7	0	-14,3	0
-15,8	8,4 E-10	-17,6	1,3 E-10	-5,8	0	-14,4	0
-15,6	6,5 E-11	-17,7	5,4 E-11	-5,4	0	-14,2	0
-15,6	4,3 E-10	-17,5	1,9 E-10	-5,9	0	-14,4	0
-15,4	2,3 E-10	-17,7	2,4 E-10	-5,3	0	-14,6	0
-15,4	2,8 E-10	-18,0	2,8 E-10	-5,8	0	-14,5	0
-15,6	4,7 E-10	-17,5	1,8 E-10	-5,9	0	-14,6	0
-15,5	8,0 E-10	-17,7	4,1 E-10	-5,8	0	-14,1	0
-15,5	5,1 E-10	-17,6	3,9 E-11	-5,7	0	-14,2	0
Průměrné hodnoty							
-15,6	4,1 E-10	-17,7	3,4 E-10	-5,7	0	-14,5	0

Tabulka A.8: Tabulka hodnot pro kódování RZ (WDM PON), délka vlákna 15 km

Délka vlákna 15 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 7,1 \text{ dBm}$		$P_v = 3,6 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-17,0	4,2 E-10	-19,4	4,7 E-10	-6,8	0	-15,4	0
-16,8	3,8 E-10	-19,4	1,5 E-10	-6,9	0	-15,2	0
-17,1	5,2 E-10	-19,3	2,1 E-10	-6,5	0	-15,5	0
-17,2	7,3 E-11	-19,5	3,6 E-10	-7,2	0	-15,5	0
-16,8	4,0 E-10	-19,7	2,8 E-10	-7,0	0	-15,7	0
-17,2	7,1 E-10	-19,4	8,4 E-11	-6,9	0	-15,2	0
-17,0	6,1 E-10	-19,3	7,9 E-10	-6,8	0	-15,4	0
-16,9	3,4 E-11	-19,6	6,3 E-10	-6,8	0	-15,6	0
-16,9	3,3 E-10	-19,7	5,8 E-10	-7,1	0	-15,5	0
-16,8	6,0 E-11	-19,4	4,2 E-10	-6,4	0	-15,4	0
-16,8	4,9 E-10	-19,2	1,7 E-10	-6,8	0	-15,6	0
-17,1	2,8 E-10	-19,3	3,3 E-11	-6,9	0	-15,8	0
-17,0	4,3 E-10	-19,2	3,1 E-10	-6,6	0	-15,3	0
-16,8	5,1 E-10	-19,5	5,2 E-10	-6,8	0	-15,5	0
-16,7	1,6 E-10	-19,6	5,9 E-10	-6,7	0	-15,6	0
-16,9	2,4 E-10	-19,4	7,3 E-10	-6,9	0	-15,5	0
-16,9	8,5 E-10	-19,5	1,6 E-11	-7,0	0	-15,5	0
-17,0	1,4 E-10	-19,5	6,5 E-10	-6,9	0	-15,4	0
-16,9	3,0 E-11	-19,2	4,0 E-10	-6,5	0	-15,4	0
-16,9	3,9 E-10	-19,5	5,1 E-10	-6,7	0	-15,6	0
Průměrné hodnoty							
-16,9	3,5 E-10	-19,4	4,0 E-10	-6,8	0	-15,5	0

Tabulka A.9: Tabulka hodnot pro kódování RZ (WDM PON), délka vlákna 19 km

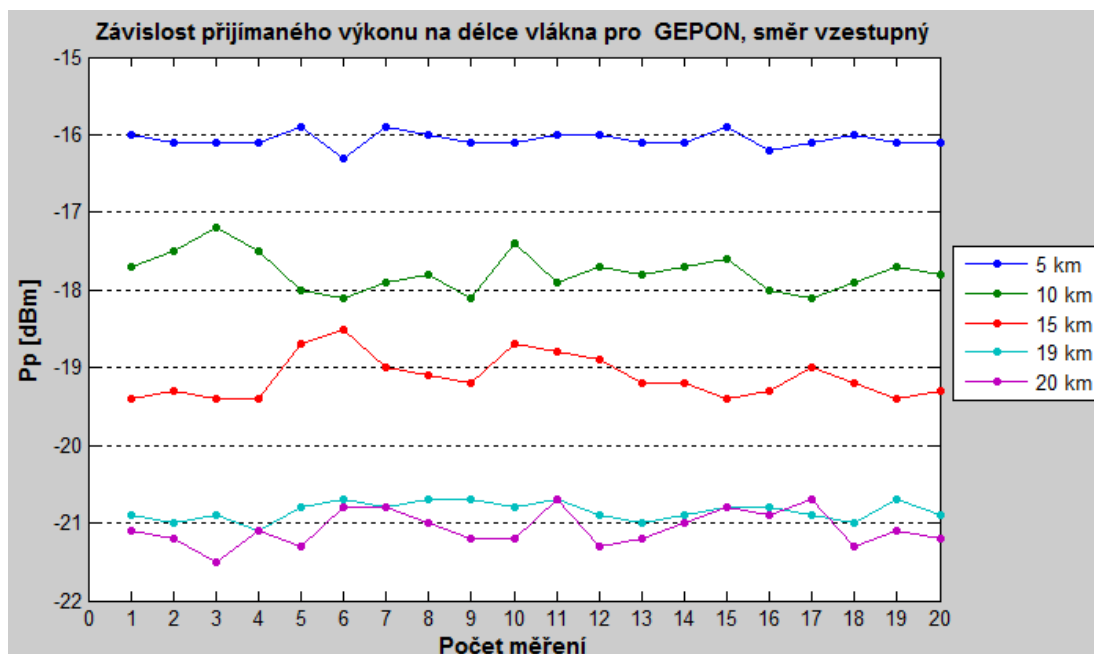
19 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 7,2 \text{ dBm}$		$P_v = 3,3 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-17,8	4,6 E-10	-20,8	6,4 E-10	-7,4	0	-16,5	0
-17,9	2,7 E-10	-21,0	1,6 E-09	-7,5	0	-16,8	0
-17,9	6,3 E-10	-21,2	7,4 E-10	-7,6	0	-16,6	0
-17,5	1,1 E-10	-21,1	6,4 E-10	-7,2	0	-16,6	0
-17,7	5,0 E-10	-20,8	2,5 E-10	-7,6	0	-16,6	0
-17,7	2,5 E-10	-20,9	3,7 E-10	-7,6	0	-16,5	0
-17,8	3,4 E-10	-20,9	4,5 E-10	-7,5	0	-16,7	0
-18,0	7,8 E-10	-20,8	6,6 E-10	-7,4	0	-16,7	0
-17,9	4,5 E-10	-21,0	1,3 E-10	-7,4	0	-16,4	0
-18,1	6,8 E-10	-20,7	3,5 E-10	-7,3	0	-16,6	0
-18,1	4,4 E-10	-20,9	6,8 E-10	-7,5	0	-16,6	0
-17,5	4,0 E-10	-20,8	4,5 E-10	-7,7	0	-16,4	0
-17,7	7,8 E-09	-20,8	8,5 E-10	-7,5	0	-16,5	0
-17,8	4,1 E-10	-21,1	1,2 E-10	-7,4	0	-16,3	0
-17,5	2,1 E-10	-20,9	3,0 E-09	-7,4	0	-16,5	0
-17,6	3,0 E-10	-21,0	8,5 E-10	-7,5	0	-16,7	0
-17,7	5,7 E-10	-21,1	6,6 E-09	-7,6	0	-16,8	0
-17,8	4,4 E-10	-20,8	5,8 E-10	-7,4	0	-16,6	0
-17,9	6,1 E-10	-20,8	1,7 E-10	-7,3	0	-16,5	0
-17,5	7,3 E-10	-20,9	4,2 E-10	-7,2	0	-16,3	0
Průměrné hodnoty							
-17,8	8,2 E-10	-20,9	9,7 E-10	-7,5	0	-16,6	0

Tabulka A.10: Tabulka hodnot pro kódování RZ (WDM PON), délka vlákna 20 km

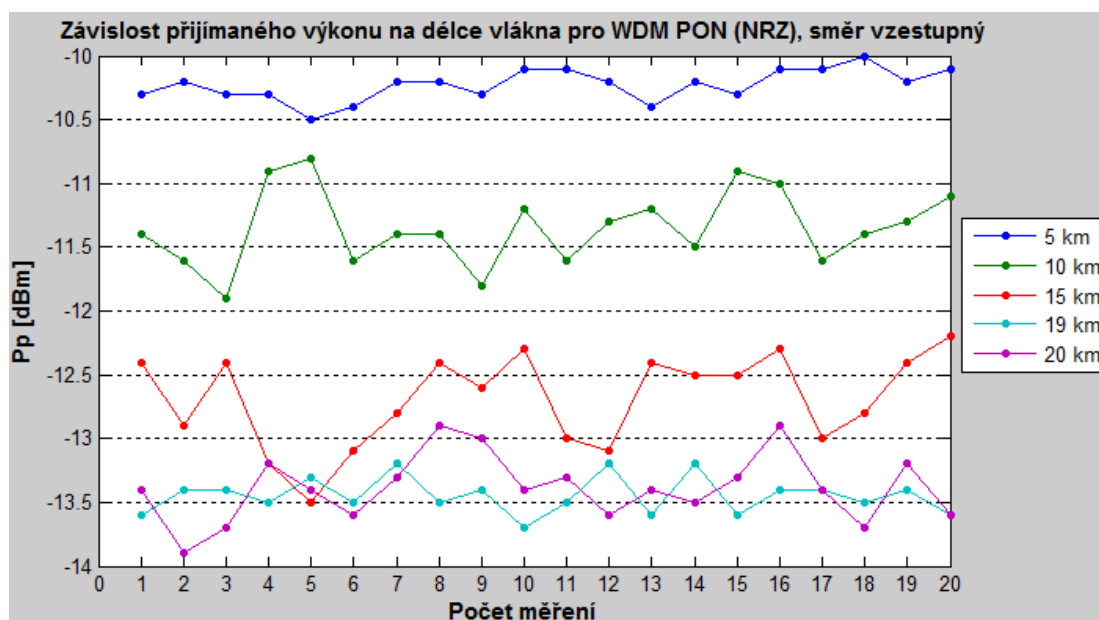
Délka vlákna 20 km							
GEPON sestupný směr		GEPON vzestupný směr		WDM PON sestupný směr		WDM PON vzestupný směr	
$P_v = 2 \text{ dBm}$		$P_v = 1 \text{ dBm}$		$P_v = 7,2 \text{ dBm}$		$P_v = 3,2 \text{ dBm}$	
$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER	$P_p \text{ [dBm]}$	BER
-18,0	1,5 E-09	-21,1	7,2 E-09	-7,7	0	-16,8	0
-18,1	1,2 E-10	-21,0	5,3 E-10	-7,8	0	-16,6	0
-17,8	6,8 E-10	-21,0	4,8 E-10	-7,7	0	-17,1	0
-17,8	6,7 E-10	-21,3	1,2 E-09	-7,6	0	-16,9	0
-18,1	3,0 E-10	-21,2	5,3 E-10	-7,4	0	-17,2	0
-18,0	5,4 E-10	-21,1	1,1 E-09	-7,9	0	-17,0	0
-18,2	6,2 E-10	-21,1	6,8 E-09	-7,9	0	-16,8	0
-18,0	2,7 E-09	-21,2	2,2 E-09	-7,8	0	-16,9	0
-18,1	1,6 E-10	-21,0	6,6 E-09	-7,7	0	-16,9	0
-18,2	8,2 E-10	-21,3	4,0 E-09	-7,7	0	-16,7	0
-17,9	1,3 E-09	-21,2	4,9 E-10	-7,5	0	-16,8	0
-17,8	5,7 E-10	-20,9	4,2 E-09	-7,6	0	-16,6	0
-18,2	7,0 E-10	-21,0	3,9 E-10	-7,3	0	-16,8	0
-18,1	8,2 E-10	-21,2	2,4 E-10	-7,4	0	-17,1	0
-18,1	1,7 E-10	-21,3	6,5 E-09	-7,6	0	-17,0	0
-18,2	9,2 E-10	-20,8	2,9 E-09	-7,5	0	-16,9	0
-17,9	3,9 E-10	-21,1	5,3 E-09	-7,8	0	-16,8	0
-18,0	3,7 E-10	-20,9	3,8 E-09	-7,8	0	-16,8	0
-18,0	2,9 E-09	-21,2	1,6 E-09	-7,9	0	-16,6	0
-18,2	2,8 E-09	-21,1	3,7 E-09	-7,8	0	-16,5	0
Průměrné hodnoty							
-18,0	9,5 E-10	-21,1	3,0 E-09	-7,7	0	-16,8	0

Příloha B: Grafy

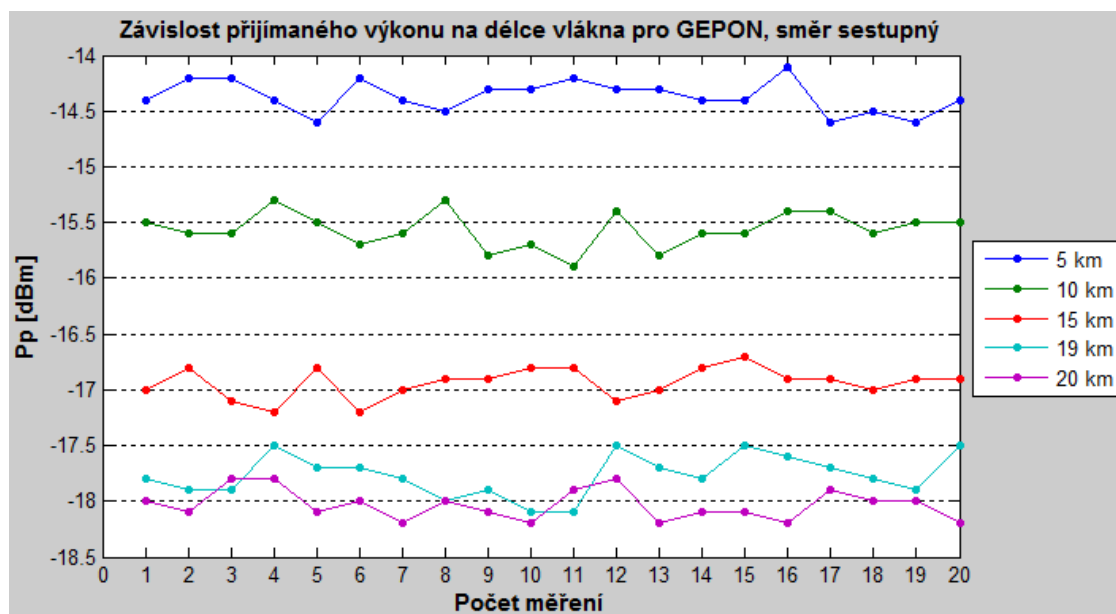
Grafy B.1 a B.2 jsou pro případ zapojení, kdy je použito NRZ kódování pro WDM PON síť. Grafy B.3 až B.5 jsou potom pro případ zapojení, kdy je u WDM PON použito RZ kódování.



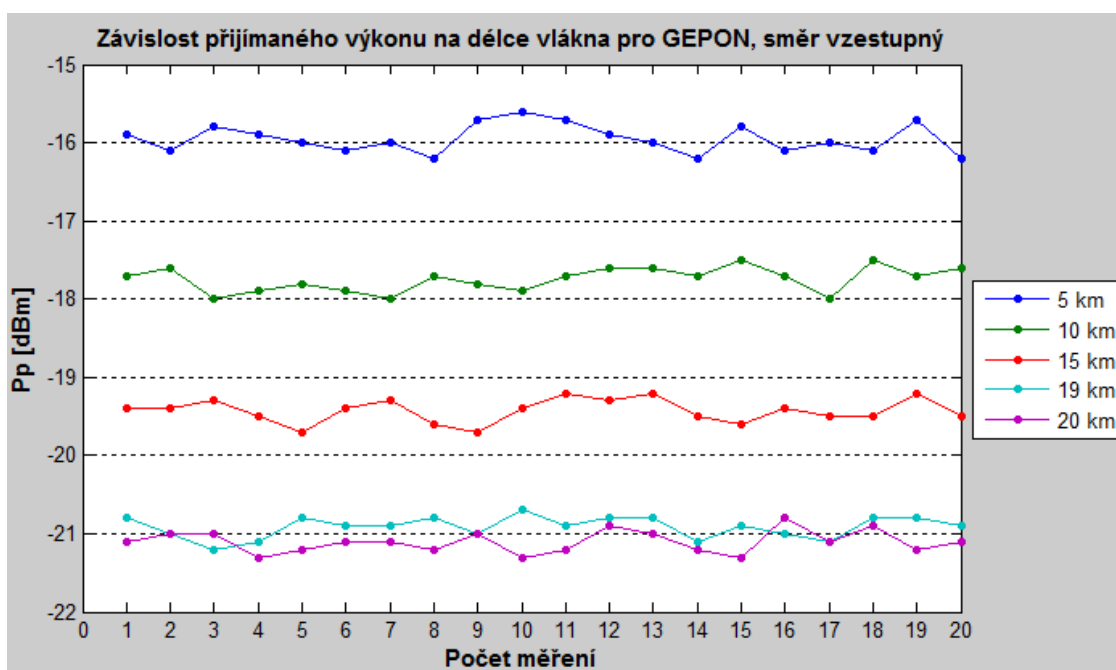
Graf B.1: Graf přijímaných výkonových úrovní signálu pro GEPON, vzestupný směr



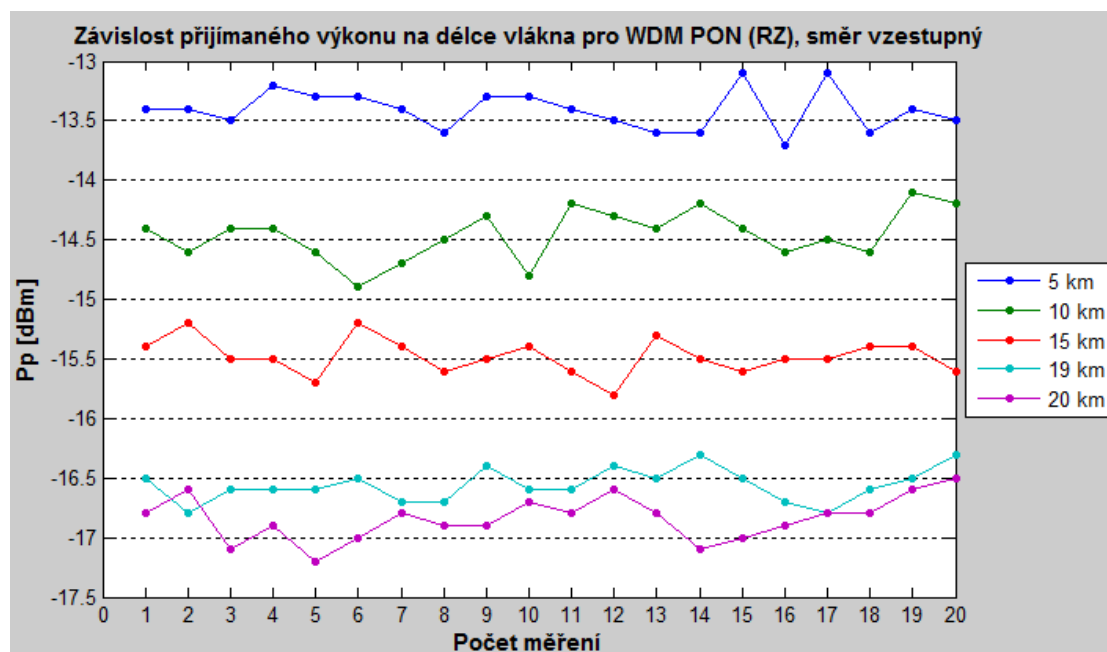
Graf B.2: Graf přijímaných výkonových úrovní signálu pro WDM PON, vzestupný směr



Graf B.3: Graf přijímaných výkonových úrovní signálu pro GEPON, sestupný směr



Graf B.4: Graf přijímaných výkonových úrovní signálu pro GEPON, vzestupný směr



Graf B.5: Graf přijímaných výkonových úrovní signálu pro WDM PON, vzestupný směr